

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

DIPLOMOVÁ PRÁCE



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

ROZŠÍŘENÍ OPTICKÉHO VLÁKNOVÉHO PŘENOSOVÉHO SYSTÉMU

EXTENSION OF OPTICAL FIBER TRANSMISSION SYSTEM

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Tomáš Horský

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Petr Dejdar

BRNO 2021

Diplomová práce

magisterský navazující studijní program **Telekomunikační a informační technika**

Ústav telekomunikací

Student: Bc. Tomáš Horský

ID: 189015

Ročník: 2

Akademický rok: 2020/21

NÁZEV TÉMATU:

Rozšíření optického vláknového přenosového systému

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Cílem práce je rozšíření přenosového systému založeného na platformě Red Pitaya. Do grafického uživatelského prostředí bude implementována možnost zvolit linkové kódy, zvýšit simulovanou přenosovou rychlost, nebo opravné kódy. Na základě vytvořeného GUI bude vytvořena laboratorní úloha, která bude názorně vysvětlovat základy optických přenosů.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] FILKA, Miloslav. Optoelektronika: Pro telekomunikace a informatiku. Vyd. 1. Brno : Centa, 2009. 369 s. ISBN 978-80-86785-14-1.

[2] Learn LabVIEW: intro to graphical programming.: Online kurz. [online]. [cit. 2018-09-12]. Dostupné z: <http://www.ni.com/getting-started/labview-basics/>

Termín zadání: 1.2.2021

Termín odevzdání: 24.5.2021

Vedoucí práce: Ing. Petr Dejdar

prof. Ing. Jiří Mišurec, CSc.
předseda rady studijního programu

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

ABSTRAKT

Diplomová práce popisuje zpracování programu pro simulaci optické přenosové trasy. Práce seznamuje se základními parametry optického přenosu, jako je útlum, disperze a šířka pásma. Dále jsou v práci popsány techniky linkových kódů a detekce chyb, zejména cyklický redundantní součet. Stěžejním parametrem této práce je disperze optického signálu. V práci je také zahrnuta charakteristika diagramu oka a jeho analýza. Výsledný program lze využít i pro měření reálné přenosové trasy a její parametry.

KLÍČOVÁ SLOVA

Detekční kódy, diagram oka, disperze, Labview, linkové kódy, optické vlákno, pasivní optická síť, přenosová rychlost, Red Pitaya, šířka pásma, útlum

ABSTRACT

The diploma thesis describes the elaboration of a program for the simulation of an optical transmission path. The work introduces the basic parameters of optical transmission, such as attenuation, dispersion and bandwidth. Furthermore, the techniques of line code and error detection are described in the work, especially a cyclic redundancy sum. The key parameter of this thesis is dispersion of the optical signal. The work includes the characteristics of the eye diagram and its analysis. The resulting program can also be used to measure the real transmission route and its parameters.

KEYWORDS

Attenuation, bandwidth, bit rate, detection codes, dispersion, eye diagram, Labview, link codes, optical fiber, passive optical network, Red Pitaya

TOMÁŠ, Horský. *Rozšíření optického vláknového přenosového systému*. Brno, 2020, 55 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací. Vedoucí práce: Ing. Dejdar Petr

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma „Rozšíření optického vláknového přenosového systému“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Brno

.....

podpis autora

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu diplomové práce panu Ing. Petru Dejdarovi, za odborné vedení, konzultace, trpělivost a podnětné návrhy k práci.

Obsah

Úvod	10
1 Optická vlákna	11
1.1 Jednovidové vlákno	11
1.2 Mnohavidové vlákno se skokovým indexem lom	12
1.3 Mnohavidové vlákno s gradientím indexem lomu	12
1.4 Druhy vláken	13
2 Parametry optického přenosu	15
2.1 Útlum	15
2.2 Šířka pásma	17
2.3 Přenosová rychlost	17
2.3.1 GPON	17
2.3.2 XG-GPON	18
2.3.3 NG-PON2	18
2.4 Disperze	19
2.4.1 Vidová disperze	19
2.4.2 Chromatická disperze	19
2.4.3 Polarizační vidová disperze	20
2.5 Diagram oka	21
2.5.1 Q-faktor, BER	22
3 Optické linkové kódy	23
3.1 Typy linkových kódů	23
3.1.1 AMI/HDB3	25
3.1.2 CMI/MCMI	25
3.1.3 5B6B	26
4 Chyby v přenosu	27
4.1 Detekční kódy	27
4.1.1 Cyklický redundantní součet	28
4.1.2 Podélný redundantní součet	29
4.1.3 Vertikální redundantní součet	30
4.1.4 Kontrolní součet	31
4.1.5 Hashovací funkce	31
4.2 Opravné kódy	32

5 Simulační program	33
5.1 Red Pitaya	33
5.2 Simulace v Labview	34
5.2.1 Linkové a detekční kódy	36
5.2.2 Přenosové rychlosti	37
5.2.3 Optická vlákna a parametry	38
5.2.4 Diagram oka	39
6 Laboratorní úloha	41
Závěr	47
Literatura	48
Seznam symbolů, veličin a zkratk	50
Seznam příloh	51
A Přední panel - simulace	52
B Přední panel - teorie	53
C Zapojení komponent	54
D Obsah přiloženého CD	55

Seznam obrázků

1.1	Vlákno jednovidové [1].	12
1.2	Vlákno mnohavidové [1].	12
1.3	Vlákno gradientní [1].	13
2.1	Útlumová charakteristika.	16
2.2	Architektura GPON [2].	18
2.3	Vidová disperze v mnohavidovém vláknu.	19
2.4	Vliv chromatické disperze na optický přenos.	20
2.5	Vznik polarizační vidové disperze.	21
2.6	Diagram oka.	22
3.1	Časové průběhy linkových kódů [1].	24
3.2	CMI a MCMi kód.	25
3.3	Ukázka tabulky pro kód 5B6B.	26
4.1	LRC kódování.	30
5.1	STEmLab platforma [16].	34
5.2	Základní funkce instrumentu Red Pitaya.	34
5.3	Detekční kód CRC32 v simulačním programu.	36
5.4	Funkce pro získání zpracovaného signálu.	37
5.5	Simulovaný signál při použití BPON a GPON.	38
5.6	Výsledné parametry v simulačním programu.	39
5.7	Části nástroje Jitter Analysis Toolkit pro tvorbu diagramu oka.	40
5.8	Diagram oka v simulačním programu.	40
6.1	Polarizační vidová disperze.	42
6.2	Útlumová charakteristika optického vlákna.	43
6.3	Diagram oka.	43
6.4	Určení Q faktoru z diagramu oka.	45

Seznam tabulek

2.1	Rychlosti vzestupného a sestupného směru technologií PON.	17
4.1	Pravdivostní tabulka operace XOR.	29
4.2	Generující polynomy [10].	29
4.3	Příklad sudé a liché parity.	30
5.1	Parametry laseru LD101 a fotodetektoru PD100 [19].	33
5.2	Možnosti výběru změny přenosové rychlosti.	38
6.1	Vstupní parametry měření.	45
6.2	Výstupní parametry měření.	46
6.3	Měření reálné trasy.	46

Úvod

Téma diplomové práce se zabývá rozšířením simulačního programu pro optickou přenosovou trasu. Optický systém využívá digitální přenos dat, u kterého je velmi důležitá synchronizace dat při příjmu. Pro správnou implementaci optického systému je nutné znát limity parametrů optických vláken, parametry laserů a fotodetektorů, využití správných linkových kódů a detekčních nebo korekčních kódů.

Cílem této práce je propojení optické trasy s měřicí platformou Red Pitaya a vytvoření simulačního programu v grafickém návrhovém programu Labview. Pro realizaci stanoveného cíle je nutné pochopit parametry optického přenosu, použití optických kódů a použití detekčních a korekčních kódů a jejich dopad na přenos.

První kapitola je věnována optickým vláknům. V rámci této kapitoly jsou popsány parametry a druhy optických vláken společně s jejich konstrukcí a využitím.

Druhá kapitola popisuje základní parametry pro optický přenos. Jsou zde popsány důvody vzniku útlumu, disperze a charakteristiky šířky pásma a přenosových rychlostí. Podrobněji jsou popsány pasivní optické sítě GPON. Součástí této kapitoly je i rozbor a charakteristika diagramu oka a parametrů BER a Q faktor, které lze získat z diagramu.

Třetí kapitola informuje o použití optických linkových kódů a jejich dopad na synchronizaci přenosu. V práci jsou zahrnuty kódy NRZ, RZ, CMI, MCMI a 5B/6B.

Čtvrtá kapitola je zaměřena na detekční a opravné kódy, které se využívají při přenosu dat. Důraz je kladen na cyklický redundantní součet, který je použit v praktické části. Dále seznamuje s dalšími kódy jako je kontrolní součet nebo hashovací funkce.

Pátá kapitola shrnuje praktickou práci. Je zde popsán použitý hardware i software. Dále je zde popsán simulační program a jeho části pro určení linkových kódů, výpočet detekčního kódu, výběr přenosových rychlostí, výběr optických vláken a implementace diagramu oka.

Poslední kapitola je laboratorní úloha pro studenty. Je zde zahrnut teoretický úvod, který tvoří části z této práce a samotná úloha s pokyny pro ovládání a vypracování laboratorní úlohy.

1 Optická vlákna

Základní struktura optických vláken se skládá z jádra, pláště, primární a sekundární ochrany, popřípadě dalších opatření. Základním materiálem pro výrobu optických vláken je SiO_2 (oxid křemičitý) a příměsi jako GeO_2 (oxid germaničitý), P_2O_5 (oxid fosforečný) nebo B_2O_3 (oxid boritý). Velikosti struktury vlákna:

- jádro - 9, 50, 62,5 μm ,
- plášť - 125 μm ,
- primární ochrana - 250 μm (400, 500, 700, 900 μm),
- sekundární ochrana - 0,9 - 2 mm.

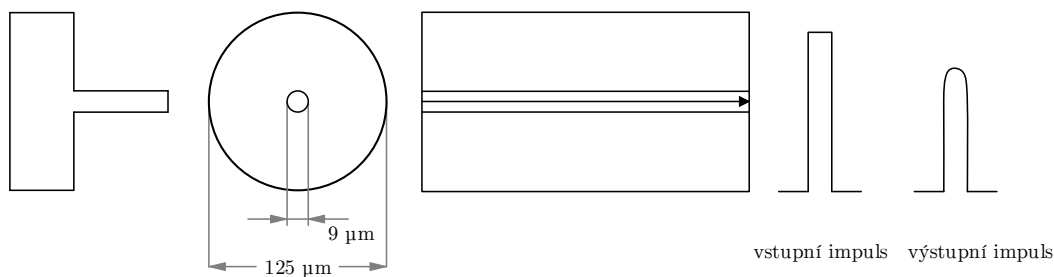
Přenosové vlastnosti jsou závislé na použité technologii optických vláken. Vlákná se dělí na jednovidové, mnohavidové s konstantním indexem lomu a na gradientní s proměnným indexem lomu. Taktéž jsou závislé na parametrech daných vláken. Základními parametry optických vláken jsou:

- útlum [dB],
- disperze [$\text{ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$],
- šířka pásma [MHz].

Dalšími parametry a pojmy optických vláken jsou absorpce, rozptyly vláken a ztráty ohybu, které souvisí s útlumem optického vlákna. Totální odraz, index lomu a numerická apertura, které popisují a definují chování se světla ve vláknu. Poslední skupinou jsou parametry, které jsou závislé na nedokonalosti vlákna: ztráty makroohyby, vazební ztráty a zbytková vlhkost [1].

1.1 Jednovidové vlákno

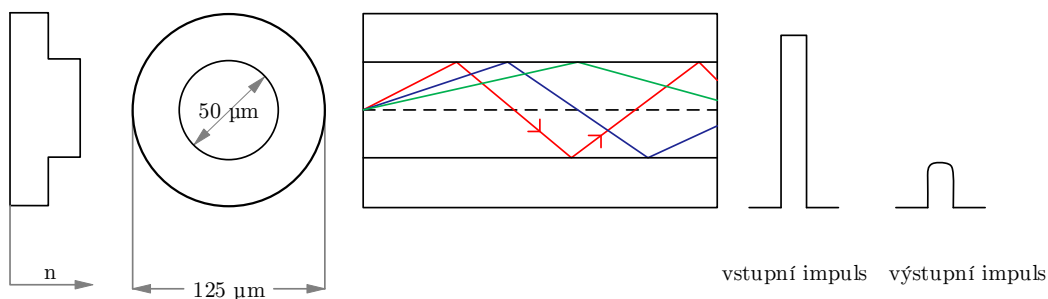
Tento typ optického vlákna se využívá pro dálkové přenosy s větší přenosovou kapacitou s rychlostmi desítek Gbit/s. Vláknem vede jediný vid (světelný paprsek) bez jakéhokoliv odrazu a ohybu uvnitř vlákna. Konstrukce vlákna je vyobrazena na obr. 1.1. Jednovidová vlákna vykazují menší disperzi, tudíž umožňují využít větší přenosovou šířku pásma. Pro buzení se využívají především DFB (Distributed feedback laser) lasery. Průměr jádra se pohybuje okolo 7 - 9 μm , nejčastěji se používá průměr 9 μm , průměr pláště je obvykle 125 μm [1].



Obr. 1.1: Vláknó jednovidové [1].

1.2 Mnohavidové vlákno se skokovým indexem lom

Světelný vid se u mnohavidových optických vláken se skokovým indexem lomu šíří pomocí úplného odrazu na rozhraní mezi jádrem a jeho pláštěm. Vláknó přenáší několik vidů, které mají různý úhel šíření, konstrukce a šíření vidů lze vidět na obr. 1.2. Využívají se na kratší vzdálenosti do několika kilometrů, především pro lokální sítě nebo automatizační účely [1].

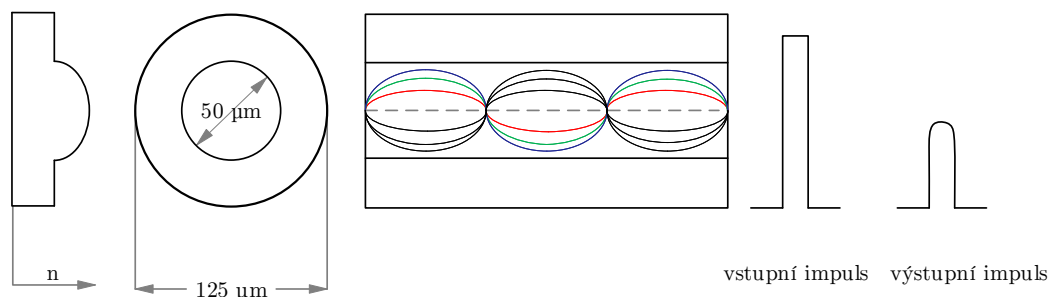


Obr. 1.2: Vláknó mnohavidové [1].

1.3 Mnohavidové vlákno s gradientním indexem lomu

Šíření vidů, se oproti vláknům se skokovým indexem lomu, mění plynule, bez skoku. Jedná se o speciálně upravené optické vlákno, které přenášené vidy ohýbá s průběhem kvadratické paraboly. Vidý šířící se po delší dráze se dostávají do oblasti s menší hustotou a jejich rychlost šíření je větší. Naopak vidy, které se šíří po kratší dráze jsou v oblasti s větší hustotou a šíří se pomaleji. Správnou výrobou a volbou

indexu lomu lze dosáhnout stejné rychlosti šíření vyšších i nižších vidů. Tento typ vlákna je dražší a složitější pro výrobu, je vhodný pro telekomunikační účely na krátkých trasách. Na obr 1.3 je vyobrazena konstrukce gradientního vlákna [1].



Obr. 1.3: Vlákní gradientní [1].

1.4 Druhy vláken

S narůstajícími nároky na přenos se začali používat jednovláková vlákna označena jako skupina G dle doporučení ITU-T. Přenos se posouvá do vlnových délek II. až V. okna (útlumové charakteristika) o hodnotách 1280 nm až 1600 nm [1].

G.652

Tento standard definuje 4 verze (A, B, C, D). Jedná se klasická jednovláková vlákna 9/125 μm . Varianty G.652.C a D využívají vlnové délky mezi 1310 nm a 1550 nm s podporou CWDM (hrubý vlnový multiplex). G.652.D je nepoužívanější typ vlákna pro 10 Gb a 40 Gb systémy [1].

G.653

Vlákna tohoto typu byla vyvinuta pro potlačení chromatické disperze u vlnové délky 1550 nm. Vlákna jsou označena jako DSF (Dispersion Shifted Fiber) a využívají se pro vyšší přenosové rychlosti po jednom vlákně. Nevýhodou těchto vláken je použití s vlnovým multiplexem, kdy dochází k překrývání jednotlivých vlnových délek [1].

G.654

Vlákna využívající se zejména pro dálkové podmořské přenosy bez zesilovače. Jejich výhodou spočívá ve velmi nízkém vloženém útlumu, který je 0.185 dB/km [1].

G.655

Vlákna s posunutou nenulovou disperzí (NZ-DSF) slouží k přenosu dat o vlnové délce 1550 nm. Využívá se v dálkových trasách využívající multiplex DWDM [1].

G.656

Optické vlákno s NZ-DSF určené pro použití v širokopásmových systémech s multiplexy DWDM a CWDM na vlnových délkách 1460 - 1620 nm [1].

G.657

Definice vláken, pro které jsou charakteristické nižší úrovní útlumu způsobené ohnutím. Dělí se na verzi G.657A a G.657B [1].

2 Parametry optického přenosu

U optického přenosu se podobně jako u metalických vedení určují zásadní parametry pro měření trasy. Mezi základní parametry optického přenosu patří: útlum, přenosová rychlost, šířka pásma (kapacita přenosu) a disperze. Pro tyto parametry je důležitá délka trasy, vlnová délka optického vlákna a různé komponenty na trase.

2.1 Útlum

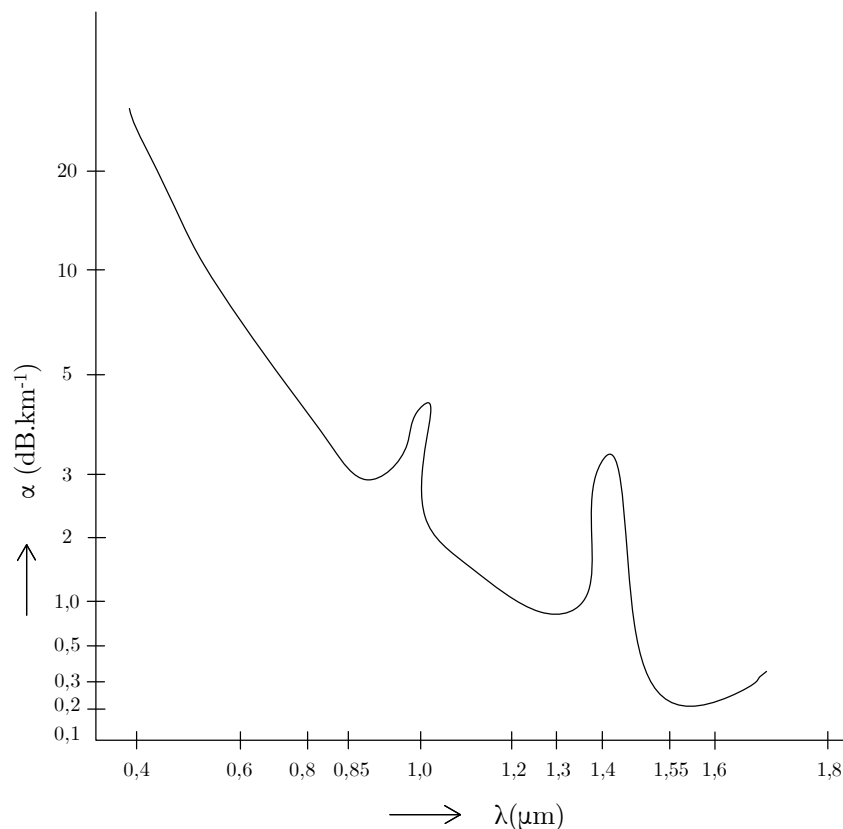
Výkon signálu se v optickém přenosu klesá se vzdáleností od zdroje. Útlum udává ztrátu optické energie v přenášeném vláknu. Tato ztráta je dána nejen délkou trasy, ale i počtem rozdělovačů, konektorů, spojek a svárů. Útlum se měří zpravidla v dB/km jako poměr vstupního optického výkonu P_1 a výstupního optického výkonu P_2 pro vlnovou délku λ použitého optického vlákna, vztah:

$$A = 10 \log_{10} \frac{P_1}{P_2}, \quad [\text{dB}] \quad (2.1)$$

Z předchozího vztahu lze získat **měrný útlum** vlákna α , který představuje optický útlum na 1 km délky dané trasy L :

$$\alpha = \frac{A}{L}. \quad [\text{dB/km}] \quad (2.2)$$

Ztrátu výkonu optického přenosu lze částečně zamezit optickým opakovačem nebo zesilovačem. Mezi významné zesilovače patří zejména EDFA (Erbium-Doped Fiber Amplifiers), který umožňuje zesílit přenos současně na více vlnových délkách. S použitím zesilovačů se cena dálkových optických tras razantně zmenšila zvýšila se kapacita přenosu. Útlumová charakteristika je zobrazena na obr. 2.1. Podle použitého optického kabelu, se charakteristika dělí do pěti oken, které se liší vlnovou délkou.



Obr. 2.1: Útlumová charakteristika.

- I. okno (850 nm). Útlumová charakteristika je zde klesající a pro dálkové přenosy je velikost útlumu vysoký. Toto okno se využívá u optických přístupových sítí.
- II. okno (120 až 1335 nm). Měrný útlum tu dosahuje nízkých hodnot využitelných jednojádrovým vláknem. Využívá se pro dálkové přenosy.
- III. okno (1530 až 1565 nm) Nejnižší měrný útlum, okno se využívá pro dálkové přenosy v transportních i globálních sítích.
- IV. okno (1535 až 1610 nm). Neliší se velmi od III. okna, využívají se společně pro rozšíření přenosové kapacity pomocí vlnového multiplexu a optických zesilovačů.
- V. okno (1335 až 1530 nm). Nejnovější technologie, která eliminuje lokální maximum při 13080 nm [1].

2.2 Šířka pásma

Tento parametr optického vlákna udává nejvyšší kmitočet přenášeného signálu, který může být přenesen na vzdálenost 1 km, udává se v MHz, popřípadě GHz·km. Šířka pásma závisí na ostatních parametrech optického vlákna, i na konstrukci a materiálu. Největší vliv na šířku pásma má vlnová délka, tudíž použitý optický kabel, kde závisí na hodnotě vlnové délky, např. 850 nm má šířku pásma 160 MHz·km, při 1300 nm může mít šířku pásma 500 MHz·km. Šířka pásma je přímo úměrná s přenosovou rychlostí, větší šířka pásma umožňuje komunikovat větší přenosovou rychlostí [1].

2.3 Přenosová rychlost

Údává počet přenesených bitů za jednotku času, běžně 1 sekunda. Vzorec:

$$R = M \log_2 Q, \quad [\text{bit/s}] \quad (2.3)$$

kde Q je počet možných stavů optického signálu, M je modulační (symbolová) rychlost, která udává počet přenesených symbolů za 1 sekundu, vztah:

$$M = \frac{1}{T_{SP}}. \quad [\text{bd}] \quad (2.4)$$

Rychlost optického přenosu závisí na použité technologii. Nejrozšířenější jsou pasivní optické sítě (PON), zejména standard GPON. Prvním standardem byl APON schválený v roce 1998 založený na technologii ATM. APON topologii využívají i ostatní standardy. Základními jednotkami jsou OLT - řídicí jednotka, ONU - optická síťová jednotka realizující převod optika/drát. Rychlosti přenosu jednotlivých PON standardů lze vidět v tabulce 2.1 [2] [3].

Tab. 2.1: Rychlosti vzestupného a sestupného směru technologií PON.

PON	Vzestupný směr [Gbit/s]	Sestupný směr [Gbit/s]
APON	0,155	0,155
BPON	0,622	0,622
GPON	2,48	2,48
XG-PON	9,94	9,94
NG-PON2	10	40

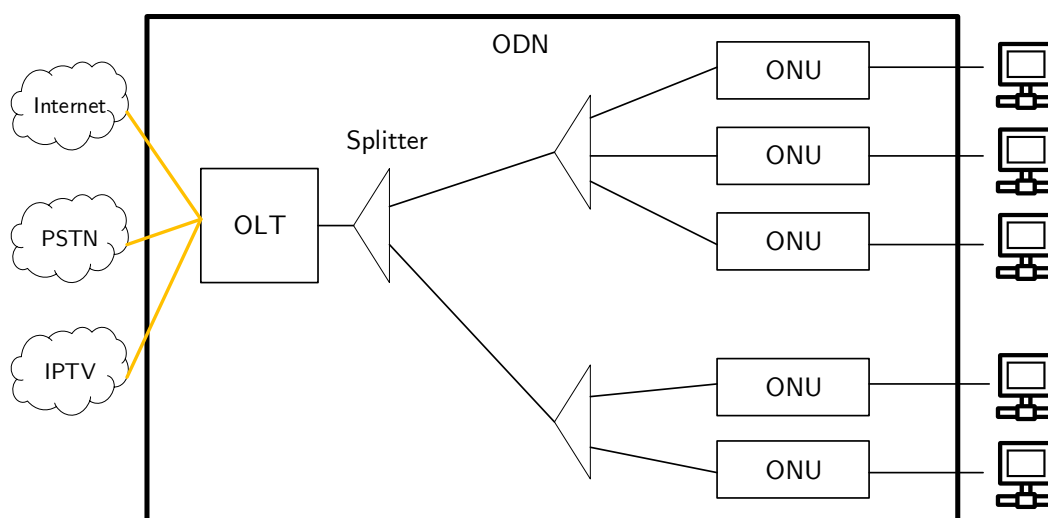
2.3.1 GPON

Gigabitová pasivní optická síť GPON je nejrozšířenější optická síť. Je definována standardem G.984.1, k přenosu využívá rámec GEM (GPON Encapsulation Method), do kterého jsou přenášená data zapouzdřena (Ethernetové rámce, ATM buňky).

Architektura GPON podporuje všechny služby: data, hlas i video. Hlavními komponenty jsou OLT (optické linkové zakončení), splitter (rozdělovač) a ONU (optická síťová jednotka) [4].

- OLT - optické zakončení, které přizpůsobuje datovou komunikaci v síti ODN (optická distribuční síť) přes rozhraní služeb poskytovatele,
- ONU - optická jednotka realizující převod komunikace u koncových uživatelů,
- splitter - optický rozbočovač, který rozděluje komunikace ke správným ONU jednotkám.

Na obr. 2.2 lze vidět architekturu sítě GPON.



Obr. 2.2: Architektura GPON [2].

2.3.2 XG-GPON

Standard PON s vyšší přenosovou rychlostí 10 Gbit/s a zpětnou kompatibilitou s GPON. Je uzpůsoben koexistovat se standardem GPON na jednom vlákně, vlnové délky jsou odděleny a nedochází k prolínání. Ke komunikaci využívá modifikovaný rámec GEM, označovaný XGEM [5].

2.3.3 NG-PON2

Jedná se poslední kompletně standardizovaný standard. Dosahuje rychlosti až 40 Gbit/s za závislosti na počtu vlnových délek. Využívá technologii WDM - zvýšení celkové přenosové kapacity vlákna s využitím většího počtu vlnových délek ve vlákně. Je zpětně kompatibilní s ostatními standardy [2] [6].

2.4 Disperze

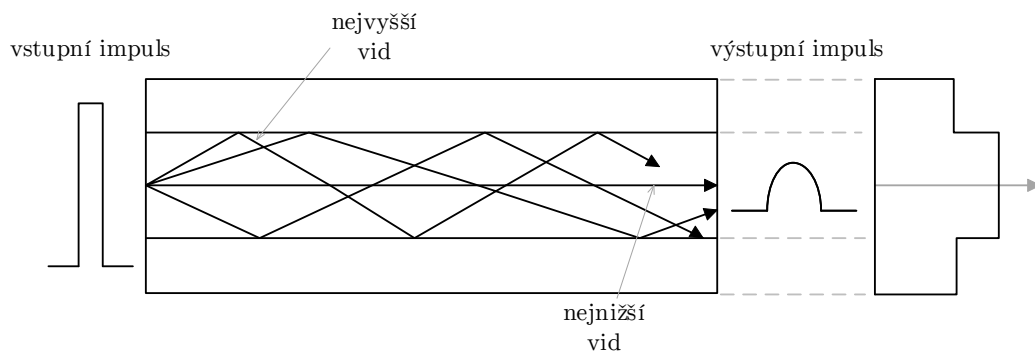
Tento parametr je hlavní důvodem zkreslení signálu, který prochází optickým vláknem. Charakterizuje vlákna z hlediska maximální přenosové rychlosti a určuje šířku přenášeného pásma. Její hodnota se udává v jednotkách $\text{ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$ reprezentující rozšíření pulsů [1].

Disperzi v optické vláknu lze rozdělit do tří druhů:

- vidová disperze,
- chromatická disperze,
- polarizační vidová disperze.

2.4.1 Vidová disperze

Tento druh disperze se projevuje výhradně u mnohavidových vláken, u jednovidových vláken je hodnota této disperze téměř nulová, tudíž se zanedbává. Zejména se projevuje u větší délky optické trasy. Vláknem se šíří vidy, jejichž trajektorie se liší, vyšší vidy se šíří pomaleji než nižší vidy, tudíž jsou mezi jednotlivými vidy časové rozestupy a dochází ke zpoždění. Hodnota pro mnohavidové vlákno se skokovým indexem lomu je 20 ns/km , což umožňuje přenos šířky pásma desítek MHz, gradientní vlákno má hodnotu 50 ps/km a přenáší jednotky GHz, a obr. 2.3 je znázorněn vznik vidové disperze v mnohavidovém vláknu [1].

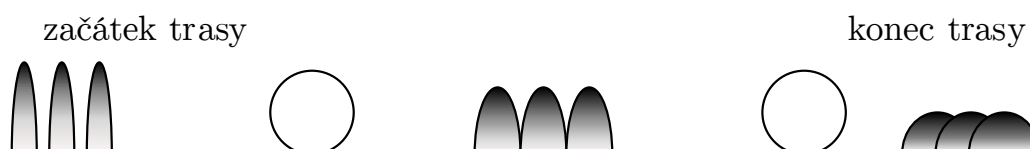


Obr. 2.3: Vidová disperze v mnohavidovém vláknu.

2.4.2 Chromatická disperze

V optickém vláknu se každá spektrální složka šíří odlišnou skupinovou rychlostí. Jednotlivé spektrální složky dorazí na konec vlákna v rozdílných okamžicích, tudíž

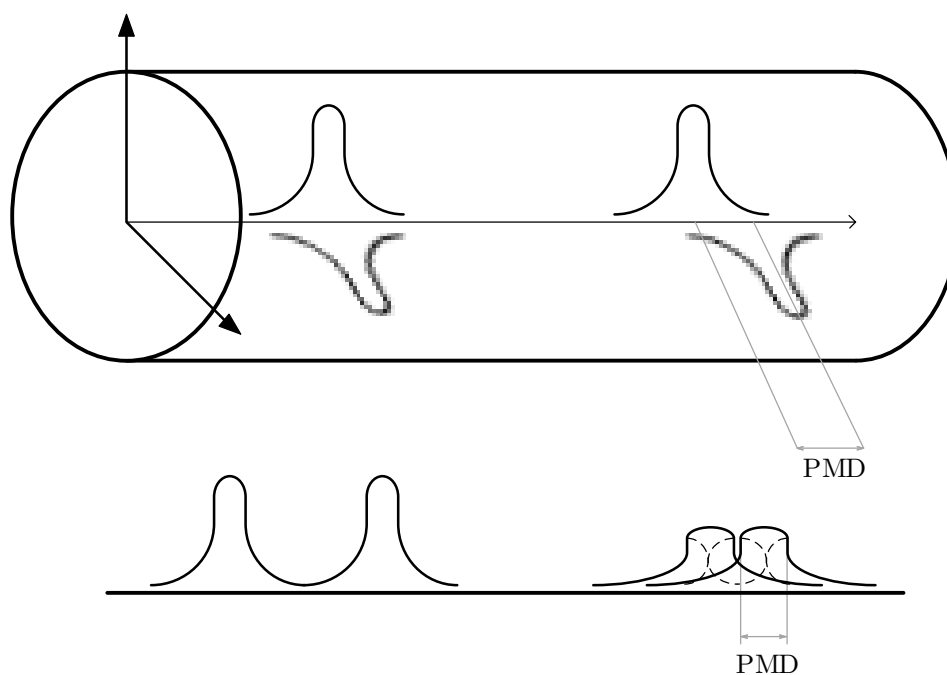
dochází ke zkreslení přenášeného signálu. Tento jev rozdílných spektrálních složek přenášené vlákem se nazývá chromatická disperze. Chromatická disperze vzniká sloučením tří disperzních složek: materiálové, vlnovodné a profilové disperze. Na obr. 2.4 je znázorněn vliv disperze na přenášený signál [1].



Obr. 2.4: Vliv chromatické disperze na optický přenos.

2.4.3 Polarizační vidová disperze

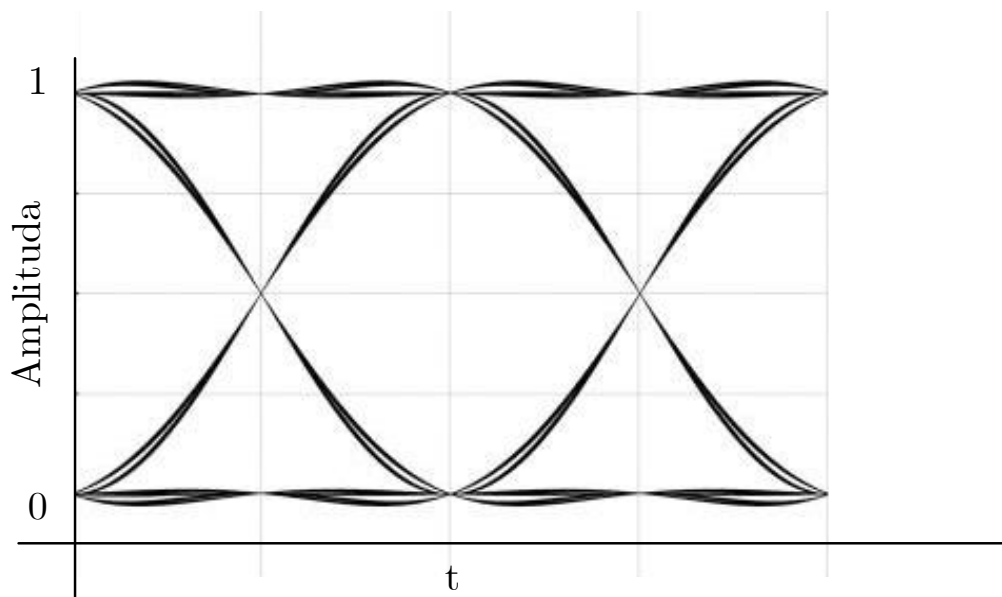
U jednovidových vláken se projevuje polarizační vidová disperze (PMD), která je definovaná jako střední hodnota rozdílu grupové rychlosti mezi dvěma hlavními stavy polarizace v optickém vláknu. Vid ve vláknu se šíří ve dvou vzájemně kolmých polarizačních rovinách. V důsledku nedokonalostí vlákna, zejména kruhová nesymetrie vlákna, se konstanty šíření i útlum obou polarizací mění. Dochází ke zpoždění jedné polarizace vůči druhé a v důsledku dochází na konci trasy mezi oběma polarizačními vidy ke zpoždění a roztažení impulsu, jak lze vidět na obr. 2.5. Tento jev omezuje maximální přenosové rychlosti a taktéž dochází ke snížení odstupu signálu od šumu. PMD je zcela náhodná pro danou trasu a nelze její hodnotu dostatečně přesně vyjádřit, což ztěžuje způsoby kompenzace jejích vlivů [1].



Obr. 2.5: Vznik polarizační vidové disperze.

2.5 Diagram oka

Charakteristika využívána pro popis závislosti amplitudy navzájem přeložených úseků digitálního signálu. Z diagramu oka lze vyčíst rozdíly mezi vysílaným a přijímaným signálem. Na obrázku 2.6, lze vidět příklad diagramu oka bez šumu [7].



Obr. 2.6: Diagram oka.

2.5.1 Q-faktor, BER

Diagram oka znázorňuje vliv rušení v měřené části přenesené sekvence. Poměr signálu k šumu (SNR) vyjadřuje parametr Q-faktor. Tento parametr popisuje kvalitu přenosového signálu, je definován jako rozdíl středních hodnot obou úrovní signálu děleno součtem odchylek obou úrovní signálu. Dalším parametrem využívající diagram oka je parametr BER (bitová chybovost kanálu), který je dán poměrem počtu chybně přenesených bitů k celkovému počtu přenesených bitů. Pro parametr BER platí rovnice 2.5 [7] [8]:

$$BER = \frac{N_E}{N_A}, \quad [-] \quad (2.5)$$

kde:

N_E počet chybných bitů,
 N_A celkový počet bitů.

Bitová chybovost kanálu BER je nepřímo úměrná Q-faktoru. Parametr BER lze vyjádřit pomocí Q-faktoru rovnicí 2.6:

$$BER = \frac{1}{\sqrt{2\pi}Q} \exp\left(\frac{-Q^2}{2}\right). \quad [-] \quad (2.6)$$

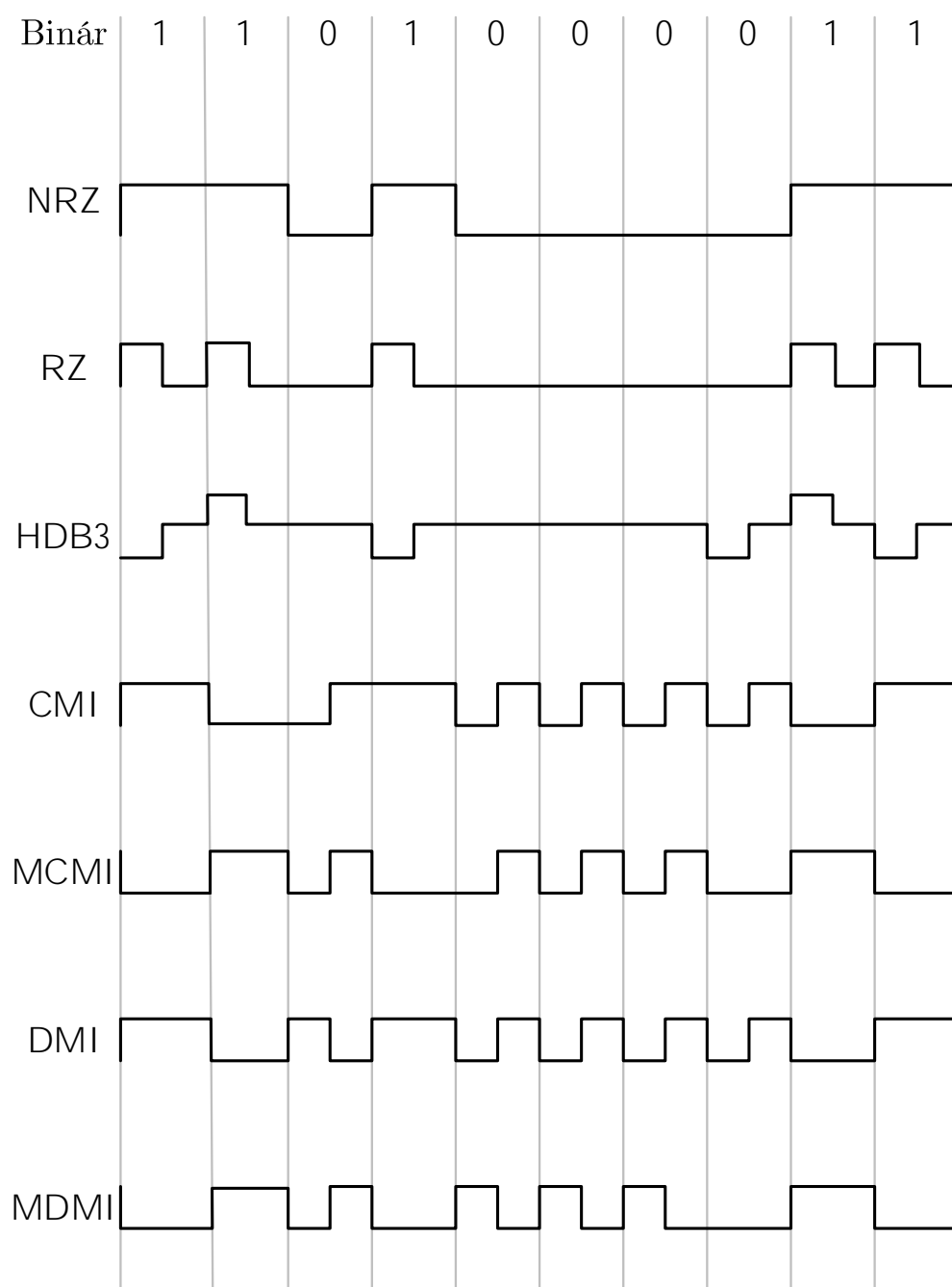
3 Optické linkové kódy

Na rozdíl od metalických vedení nemůže světlo v optickém přenosu nabývat záporných hodnot. Záporná polarita například u kódů AMI (Alternate Mark Inversion) a HDB3 (High-density Bipolar-3 zeros) nelze reprezentovat přímo, ale například předpětí třístavovým kódem nebo unipolárním kódem s informačním obsahem větším nebo rovným ternárnímu kódu. Nejpoužívanější možností je převod bipolárního signálu do binární formy s následným přechodem na linkový kód. Výběr kódu záleží na uspořádání přenosového systému. Je zapotřebí, aby linkový kód splňoval tyto požadavky:

- vysoká taktovací složka,
- minimální šířka pásma,
- konstantní stejnosměrná složka,
- možnost detekce chyb,
- systémová kompatibilita.

3.1 Typy linkových kódů

Často jsou používány jednoduché kódy NRZ (kód bez návratu k nule) a RZ (kód s návratem k nule), avšak je nutné k těmto kódům využívat další kódovací a dekódovací zařízení k vyloučení dlouhých posloupností logických jedniček nebo nul. Dalšími kódy jsou například CMI (Codec Mark Inversion), který vychází z NRZ kódu a MCMI (modifikované CMI), který vychází z kódu HDB3 a jeho úpravy do optického přenosu. Pro přenos signálu vyšších řádů se používají blokové kódy typu mBnB, kde se zpráva o délce m bitů kóduje na zprávu o délce n bitů, například kódy 1B2B a 5B6B. Časové průběhy lze vidět na obr. 3.1.



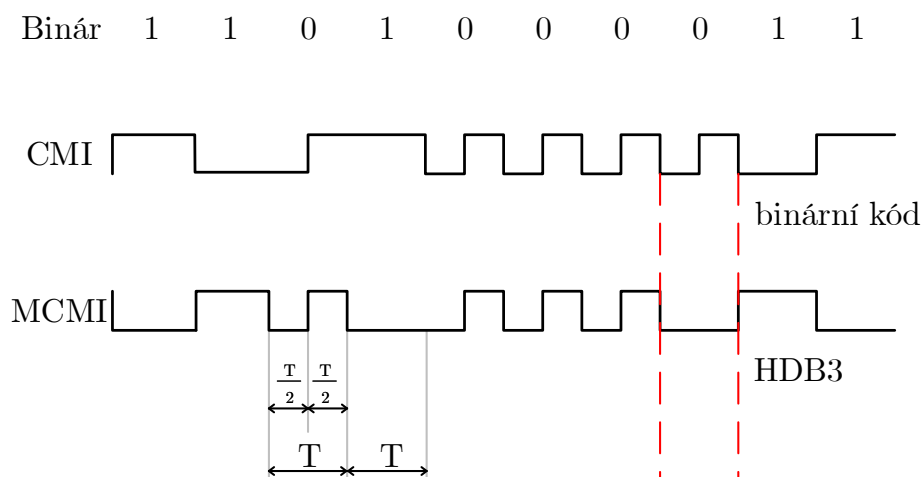
Obr. 3.1: Časové průběhy linkových kódů [1].

3.1.1 AMI/HDB3

Třístavově úrovněvý linkový kód AMI reprezentuje logickou 0 jako konstantní úroveň. Logická 1 je reprezentována střídavě jako impuls o velikosti $+A$ nebo $-A$. U AMI kódu je problémem udržení synchronizace při dlouhých posloupnostech logické 0. Tento problém řeší HDB3 úpravou, u které, jestliže se vyskytne skupina čtyř shodných symbolů logické 0, pak je tato skupina vyjádřena skupinou symbolů B00V nebo 000V. U 000V (violation impuls) se případná čtvrtá nula nahrazuje impulzem stejné polarity jako impuls předchozí. Pokud počet logických 1 není mezi V impulzy liché, pak se navíc první nula ve skupině nahrazuje B00V (balancing impuls) impulzem, který má opačnou polaritu, jako impuls předchozí [1].

3.1.2 CMI/MCMI

Kód CMI je alternativou AMI kódu pro optické přenosy. Je to dvou úrovněvý kód, u kterého logická 0 reprezentuje oba amplitudové úrovně $+A$ i $-A$. Půl periody je reprezentována zápornou úrovní a půl periody kladnou úrovní. Logická 1 je reprezentována celou periodou střídajících se záporných a kladných úrovní. CMI kód je přímo přiřazen k binárnímu kódu, zatímco kód MCMI je přiřazen ke kódu HDB3, obr. 3.2, kde čtvrtá nula v pořadí je reprezentována jako záporná perioda [9].



Obr. 3.2: CMI a MCMI kód.

3.1.3 5B6B

Metoda blokového kódování, kde je 5 bitů původních dat nahrazeno 6-ti bitovými daty. Vstupní i výstupní data používají k mapování blokovou tabulku, která je vytvořena podle předdefinovaných pravidel, obr. 3.3. 5B6B kód je považován za optimální [1].

5B binární vstup	6B binární výstup
00000	100111
00001	011101
00010	101101
00011	110001
00100	110101

Obr. 3.3: Ukázka tabulky pro kód 5B6B.

4 Chyby v přenosu

Při přenosu informací pomocí optických tras může docházet k chybám v bitové posloupnosti. K těmto chybám může docházet z důsledku působení disperze na signál nebo z mechanických nedostatků vysílače nebo přijímače. Při optickém přenosu bude docházet ke změnám pozic vysílaných jedniček a nul. Tyto změny mohou vést ke ztrátě informací při přenosu. Obecně se uvádějí 3 typy chyb, které se můžou vyskytnout v přenosu:

- Jednabitové chyby: V celé sekvenci bitů, je chybný jediný bit. Tento typ chyby se v komunikačních přenosech vyskytuje velmi zřídka.
- Vícebitové chyby: V přenosu se může vyskytovat 2 a více chyb.
- Blokové chyby: Jedná se o výskyt více chyb v bitové sekvenci. Blok chyb se počítá od prvního chybového bitu po poslední, bity mezi těmito chybami jsou také považovány za chybné. Tento typ chyb je složité detekovat a opravit [11].

4.1 Detekční kódy

V digitálních komunikačních systémech jsou chyby přeneseny společně s daty. Tyto chyby je zapotřebí detekovat a opravit, jinak může dojít ke ztrátě informace. Pro efektivní komunikaci, musí být data přeneseny s maximální přesností. K tomu se využívají detekční a následně opravné kódy. Detekce kódu je proces detekování chyb, které se momentálně nacházejí v datech. K detekci se využívají redundantní kódy, které se přidávají k datům před přenosem. Typy detekcí:

- Cyklický redundantní součet (CRC)
- Podélný redundantní součet (LRC)
- Vertikální redundantní součet (VRC)
- Kontrolní součet

4.1.1 Cyklický redundantní součet

Využívá vlastnosti cyklických kódů, které při každém cyklickém posuvu kódovaného slova, vytvoří další kódové slovo. CRC je zkrácený cyklický kód, který se využívá k detekci chyb v sekvenci dat. Jsou implementovány využitím posuvných registrů se zpětnou vazbou. Příklad generace CRC kódu:

```
1101      <--- vstupní posloupnost
1011      <--- generující posloupnost
```

```
1101 000 <--- doplnění nulami
```

```
1011
```

```
110 0
```

```
101 1
```

```
11 10
```

```
10 11
```

```
1 010
```

```
1 011
```

```
001 <--- zbytek
```

```
1101 001 <--- výstupní posloupnost
```

Výsledná posloupnost je vyslána z vysílače přenosovou trasou, kde může dojít ke změně některého bitu. Kontrola přijaté posloupnosti probíhá následovně:

```
1101 001
```

```
1011
```

```
110 0
```

```
101 1
```

```
11 10
```

```
10 11
```

```
1 011
```

```
1 011
```

```
000 <--- nulový zbytek
```

Nulový zbytek znamená, že přenos dat proběhl bez chyb. Pokud by výsledný zbytek byl jiný než nulový, tak by se data musela posílat znovu a celý postup by se opakoval [12]. CRC využívá binárně logickou operaci XOR, v tabulce 4.1 jsou uvedeny všechny možné kombinace dvou operátorů a jejich výsledku po aplikování operace XOR.

Tab. 4.1: Pravdivostní tabulka operace XOR.

XOR	0	1
0	0	1
1	1	0

Generující polynom

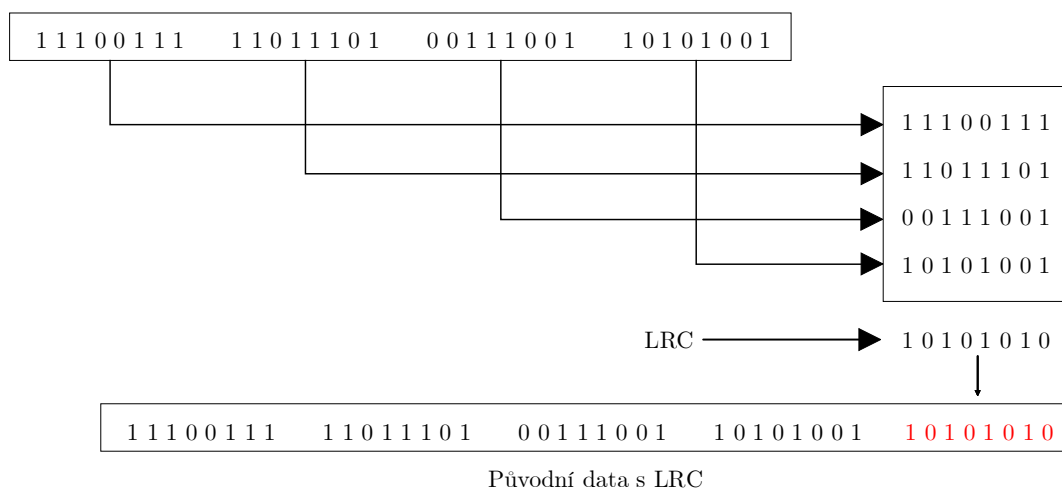
Pravidla pro výpočet různých CRC se nemění, avšak polynomy se můžou lišit, záleží na použitém protokolu. Struktura a délka polynomů mají velký vliv na schopnost detekce chyb a velikost redundance. V tabulce 4.2 jsou uvedeny obvyklé polynomy a jejich použití [10].

Tab. 4.2: Generující polynomy [10].

CRC kód	Polynom
CRC-CCITT X25	$x^{16} + x^{12} + x^5 + 1$
CRC-32 Ethernet	$x^{32} + x^{26} + x^{23} + x^{22} + x^{16} + x^{12} + x^{11} + x^{10} + x^8 + x^7 + x^5 + x^4 + x^2 + x + 1$
GSM TCH/FS-HS-EFS	$x^3 + x + 1$
GSM TCH/EFS pre-coding	$x^8 + x^4 + x^3 + x^2 + 1$
GSM - FIRE kód	$x^{40} + x^{26} + x^{23} + x^{17} + x^3 + 1$

4.1.2 Podélný redundantní součet

Metoda kódování, ve které jsou data poskládány do tabulkového formátu, z které se poté počítají paritní bity pro každý řádek v tabulce. Paritní bity z každého řádku jsou poté seskupeny a připojeny k původním datům před přenosem komunikačním kanálem. Tato metoda detekuje blokové a jednobitové chyby, ale nedokáže detekovat 2 chyby v jednom řádku tabulky. Příklad LRC kódování lze vidět na obr. 4.1.



Obr. 4.1: LRC kódování.

4.1.3 Vertikální redundantní součet

Tento detekční kód, též známý jako "Kontrola paritního bitu" je založený na přidání bitu k přenášeným datům. Před přidáním paritního bitu se sečte počet jedniček nebo nul v datové sekvenci a na základě výsledného počtu se přidá paritní bit. Přidáním paritního bitu zvyšujeme celkovou délku sekvence o 1 bit. Existují dva typy paritních bitů v detekčních kódech, tab. 4.3:

- Sudá parita
- Lichá parita

Tab. 4.3: Příklad sudé a liché parity.

Sudá parita		Lichá parita	
Data	Parita	Data	Parita
000	0	000	1
001	1	001	0
010	1	010	0
011	0	011	1
100	1	100	0
101	0	101	1
110	0	110	1
111	1	111	0

Sudá parita funguje na principu sčítání všech jedniček v sekvenci, pokud je součet sudý, k sekvenci se přidá paritní bit 0. Naopak při lichém počtu jedniček, je paritní bit 1. Lichá parita funguje obráceně. Ve vysílači se tento bit připojí k datům a pošle se komunikační trasou. Přijímač zkontroluje přijatou sekvenci a pokud paritní bity nejsou stejné, vyhodnotí sekvenci jako chybnou [11].

4.1.4 Kontrolní součet

Metoda kódování, kde je součet založen na hodnotách, které se nacházejí v bloku dat při přenosu telekomunikačním kanálem. Pro součet využívá definovaných algoritmů pro daný přenos. Velikost bloků z pravidla bývá 8, 16 nebo 32 bitů. Existuje několik typů kontrolní součtu [13]:

- Kontrolní součet přidání celého čísla,
- Kontrolní součet doplňku,
- Fletcherův kontrolní součet,
- Adlerův kontrolní součet,
- ATN kontrolní součet.

4.1.5 Hashovací funkce

Speciální matematicko-kryptografická funkce, jejíž úkolem je vytvoření jednoznačného otisku, který vznikne aplikací hashe na datovou sekvenci. Sekvenci libovolné délky konvertuje na konstantní délku zvanou hash. Hashovací funkce mají dvě klíčové vlastnosti.

- jednosměrnost,
 - z hashe nelze vytvořit původní datovou sekvenci,
- jednoznačnost.
 - vytvoření otisku pro zajištění integrity, v případě změny znaku v sekvenci se nově vytvoří hash - srovnání původního a nového hashe lze jednoznačně dokázat.

Secure Hash algoritmus

SHA hashovací funkce jsou standardy definované podle NIST (National Institute of Standards and Technology). První specifikací byla SHA-0, která byla nahrazena z bezpečnostních důvodů specifikací SHA-1. SHA-1 standard produkuje 160 bitový klíč vytvořený ze vstupní zprávy. Tato vstupní zpráva je rozdělena do bloků o délce 512 bitů: SHA-1 pracuje s bloky o velikosti 160 bitů, které jsou rozděleny na 5 bitových slov, tudíž po 32 bitech. Vstupní blok je rozšířených v každém cyklu na

80x32 bitových slov. Jedno 32 bitové slovo pro každé výpočetní kolo algoritmu SHA-1.

SHA-2 je skupina čtyř hashovacích funkcí. Jednotlivé varianty jsou pojmenované podle jejich bitové délky: SHA-224, SHA-256, SHA-384 a SHA-512. Nejrozšířenějšími jsou SHA-256, která pracuje s 32 bitovými slovy a SHA-512 s 64 bitovými slovy. SHA-256 rozdělí a zároveň vstupní zprávu na bloky o velikosti 512 bitů. Algoritmus poté pracuje s bloky o velikosti 256 bitů, které jsou rozděleny do 8 bitových slov. U SHA-2 funkcí dochází ke komplikovanějším výpočtům než u SHA-1 a jsou považovány za bezpečné [14].

4.2 Opravné kódy

Detekční kódy pouze detekují výskyt chyby v sekvenci dat. K detekci a opravě chyb se využívají opravné kódy. Je možné opravit 1 nebo sekvenci chyb při přenosu. Nejpoužívanější metody opravy kódu v komunikačních sítích a digitálních systémech jsou Hammingovy kódy.

Princip Hammingových kódů spočívá ve vložení paritních bitů, které se nachází v dané pozici v kódovém slově. Počet paritních bitů závisí na počtu informačních bitů v sekvenci. Hammingovy kódy k opravě využívají redundantní bity, které určují rozdíl mezi přenesenými a původními daty. Redundantní bity jsou vloženy do kalkulovaných pozic pro eliminaci chyb. Vzdálenost mezi dvěma redundantními bity se nazývá Hammingova vzdálenost, která je rovna 3. Rozšířený Hammingův kód má Hammingovu vzdálenost rovnu 4 [15].

5 Simulační program

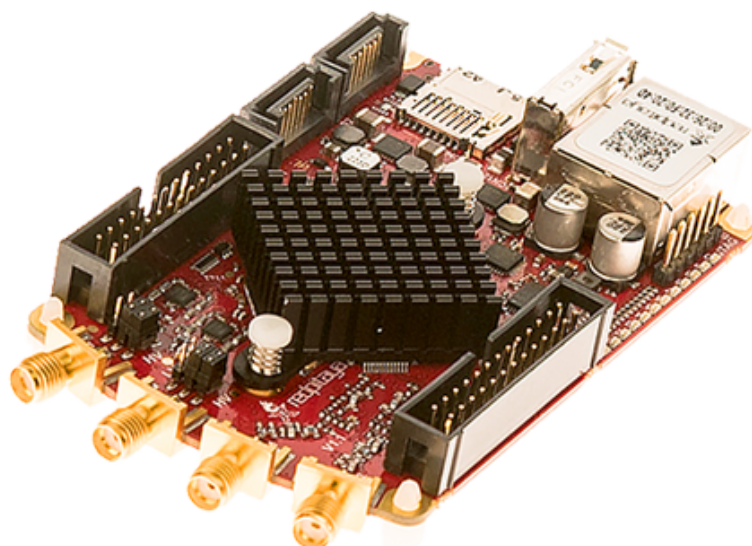
Simulovaná optická trasa se skládá z měřicí platformy Red Pitaya, která zajišťuje generaci a opětovný příjem signálu. Platforma je připojena k optickému kabelu, který je připojený do systému od firmy Koheron, laser a fotodetektor, parametry jsou uvedené v tabulce 5.1. K simulaci se využívá grafický návrhový software Labview, který je připojen pomocí SCPI serveru (Standardizované příkazy pro programovatelné přístroje) k platformě Red Pitaya.

Tab. 5.1: Parametry laseru LD101 a fotodetektoru PD100 [19].

Nízkošumový laser LD101	
Vlnová délka	1550 nm
Optický výkon (30 mA)	3 mW
Optický výstup	1 m SM vlákno s FC/APC konektorem
Šířka pásma	40 MHz
Nízkošumový fotodetektor PD100	
Vlnová délka	900 - 1700 nm
Šířka pásma	1,6 kHz - 105 MHz
Výstup	SMA

5.1 Red Pitaya

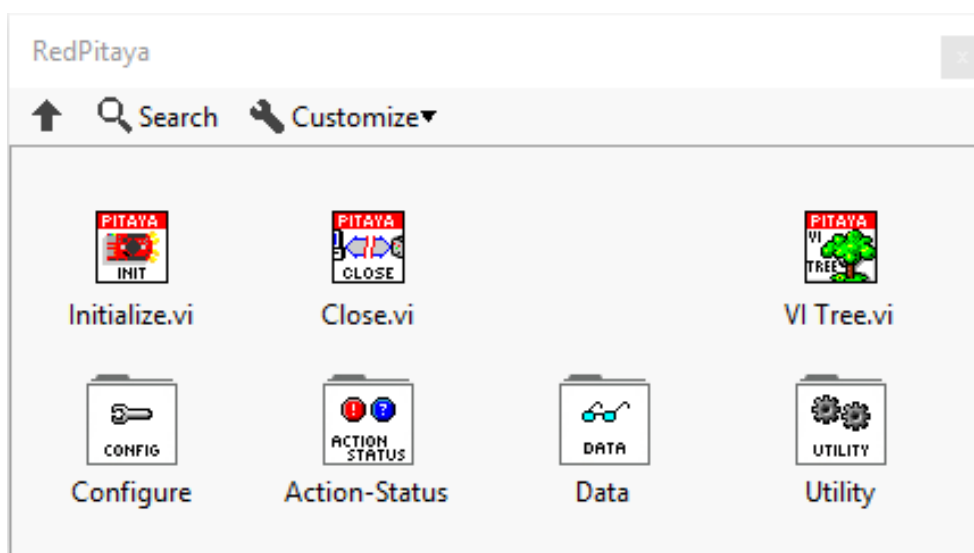
Měřicí platforma STEMLab obsahuje 2 vstupy a 2 výstupy pro generaci a příjem dat. Platforma obsahuje ethernetový port pro komunikaci s počítači v síti LAN. Pro práci se využila bezdrátová volba připojení, USB Wi-Fi dongle. V platformě lze nastavit dynamickou i statickou IP adresu, v simulačním programu je využita statická IP adresa. Pro komunikaci s programem Labview je nutné ve webovém rozhraní zapnout SCPI server, nebo po připojení do rozhraní platformy (Linux terminál), SCPI server nastavit na automatické zapínání při zapojení platformy do sítě. Platformu STEMLab lze vidět na obr. 5.1.



Obr. 5.1: STEMlab platforma [16].

5.2 Simulace v Labview

Tento grafický návrhový software se využívá testování a návrh různých systémů, které vyžadují kontrolu a přímý přístup k použitému hardwaru. Pro komunikaci s platformou Red Pitaya využívá vytvořené rozhraní obr. 5.2. Pomocí tohoto rozšíření lze navázat spojení, generovat a modifikovat data a nakonec i přijmout výsledná data [17].



Obr. 5.2: Základní funkce instrumentu Red Pitaya.

Nástroje použité v simulačním programu jsou:

- Initialize a Close - vytvoření a konec spojení s platformou RedPitaya, ke spojení se využívá řetězec, kde se zadává IP adresa SCPI serveru platformy,
- Configure Standart Waveform - změna frekvence signálu,
- Configure Arbitrary Waveform - získání generovaných dat z předchozího kódu (vstupem je binární posloupnost),
- Configure Acquisition - konfigurace vzorkovací frekvence (15,6 MHz),
- Configure Edge Trigger - nastavení pozice a hodnoty triggeru přijímaného signálu,
- Triggered Acquisition - nastavení hrany triggeru (náběžná hrana),
- Wait for Trigger - čekání na vykonání triggeru (časový údaj),
- Read Waveform - získání výsledného signálu a vypsání do grafu [18].

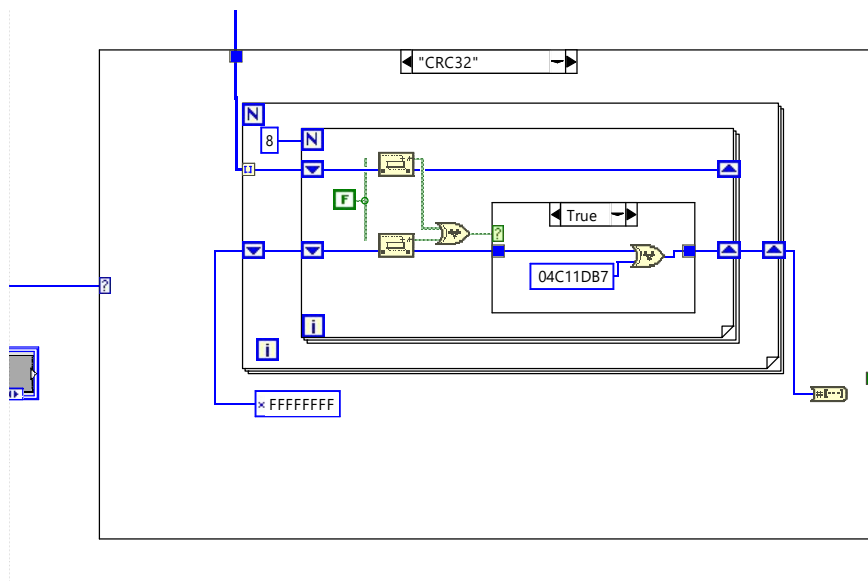
Simulační program je rozdělen do dvou hlavních částí: část před zpracováním platformou Red Pitaya a část po zpracování. Část před zpracováním obsahuje vytvoření vstupního signálu (řetězec, který se převede do binární posloupnosti), simulaci linkových kódů (NRZ, RZ, CMI, MCMI a 5B/6B), výpočet kontrolního součtu z původních dat (CRC16 a CRC32) a změna frekvence (podle šířky pásma nebo technologie PON).

Po zpracování platformou se na datové posloupnosti simulují optické vlákna (POF, jednovidová a mnohavidová různých vlnových délek), délka trasy (0 - 100 Km), simulace a výpočty disperze a útlumu a výsledné zpracování a prezentace signálu v grafu a diagramu oka.

5.2.1 Linkové a detekční kódy

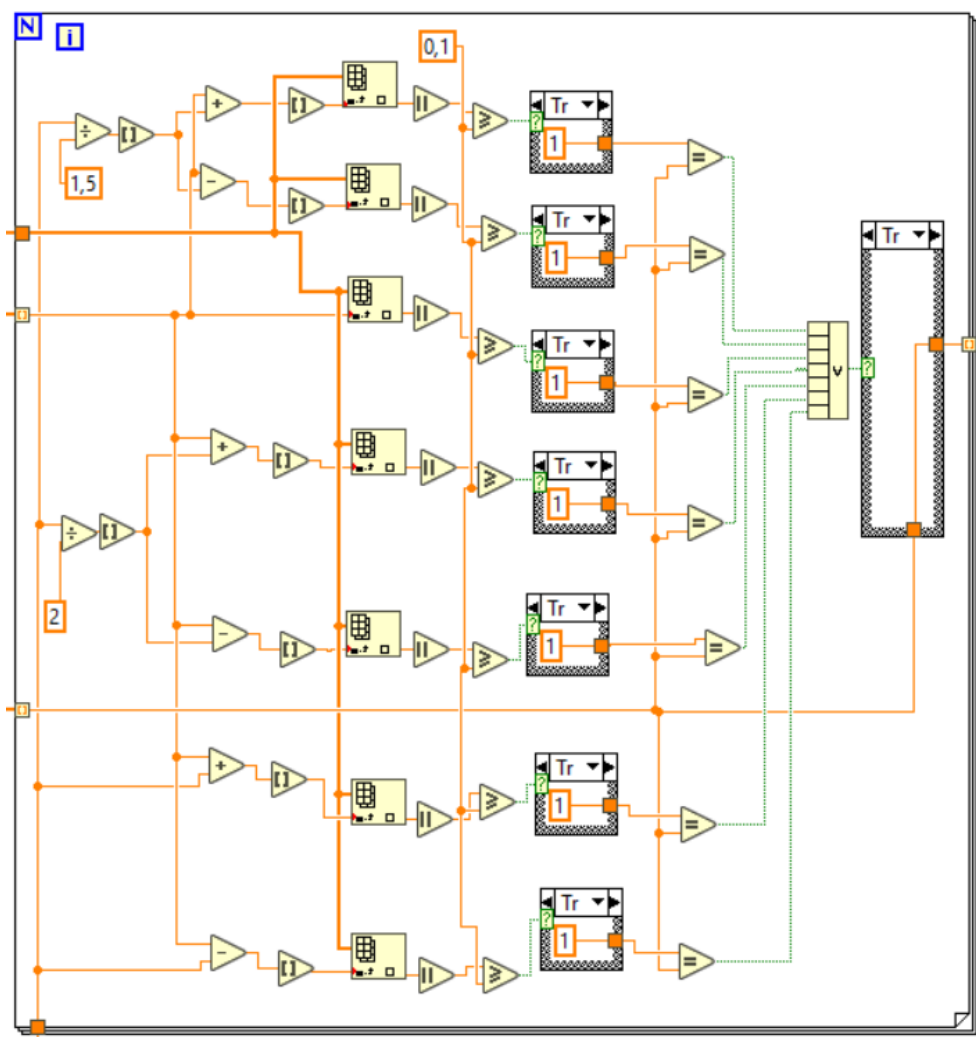
V simulačním programu je možné zvolit 4 optické linkové kódy NRZ, RZ, CMI a MCMI. Tyto kódy je možné kombinovat s kódem 5B/6B, který blok 5ti bitů převede na bloky 6ti bitů podle vlastní tabulky, která je implementována v kódu.

Vstupní řetězec je převeden do binární posloupnosti (jednorozměrné pole hodnot) se kterou se již pracuje v dalších blocích. Z posloupnosti je vypočítán cyklický redundantní součet (CRC). Je možné použít CRC16 s polynomem 0x8005 nebo CRC32 s polynomem 0x04C11DB7, jehož implementace v programu lze vidět na obr. 5.3.



Obr. 5.3: Detekční kód CRC32 v simulačním programu.

CRC se počítá z původních dat před simulací a volbou parametrů, a po simulaci. Výsledné hodnoty součtů jsou porovnány a je vyhodnoceno, zda se jedná o přenos s chybou nebo bez chyby (z důsledků disperze a útlumu). Hodnoty po simulaci se získávají pomocí rozhodovacího pole a funkce OR. Z posloupnosti dat se získá hodnota indexu, která leží uprostřed pulsu. Z této hodnoty se poté vypočítají další blízké hodnoty, které se poté porovnávají a jejich výstup je vstupem do rozhodovacího pole s funkcí OR. Pokud je jedna z hodnot rovna původní hodnotě, je index vyhodnocen jako pravdivý - hodnota indexu nezměnila původní hodnotu. Tento proces je opakován pro každý zaslaný bit. Na obr. 5.4 lze vidět výše popsanou funkci pro získání zpracovaného signálu.



Obr. 5.4: Funkce pro získání zpracovaného signálu.

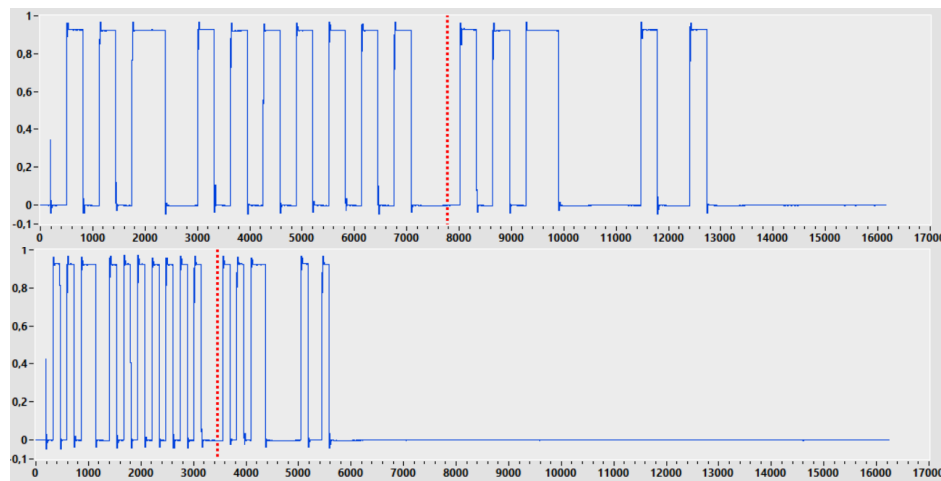
5.2.2 Přenosové rychlosti

Simulovanou rychlost přenosu lze zvolit podle šířky pásma nebo standardu PON sítí (změna frekvence v bloku Configure Standart Waveform), rychlosti PON odpovídají sestupnému směru. Hodnoty jsou simulovány podle výpočtů z reálných hodnot, které platforma Red Pitaya umožňuje. Hodnoty jsou kalkulovány ze vztahu: 1 vzorek (sample) se rovná přibližně 64 ns (celkově je možné zobrazit 16384 vzorků), podle tohoto vztahu bylo možné vypočítat hodnoty pro různé vstupní frekvence. V tabulce 5.2 jsou vypsány hodnoty šířky pásma a standardy PON, které je možné využít v simulačním programu.

Tab. 5.2: Možnosti výběru změny přenosové rychlosti.

Šířka pásma	Standard PON
1 MHz	BPON
100 MHz	GPON
1 GHz	XG-PON
10 GHz	NG-PON2

Možnost 1 MHz je reálná hodnota, která není simulovaná. Přenosová rychlost lze měnit kdykoliv při běhu programu a demonstruje změnu šířky impulzů přenášených dat a účinek disperze na tyto impulzy. Na obr. 5.5 lze vidět rozdíl simulovaného signálu při použití standardu BPON (výše) a GPON.



Obr. 5.5: Simulovaný signál při použití BPON a GPON.

5.2.3 Optická vlákna a parametry

Při změně délky simulované trasy dochází ke změnám výsledného signálu. V simulačním programu jsou implementovány změny disperze a útlumu při změně délky trasy. Změny disperze se především liší při změně šířky pásma nebo použité technologie, útlum je více závislý na použitém optickém vlákně (polymerová, mnohavidová a jednovidová vlákna). Pro simulaci je možné vybrat vlákna:

- POF (650 nm),
- MMF (850 nm),
- MMF (1310 nm),
- SMF (1310 nm),
- SMF (1550 nm).

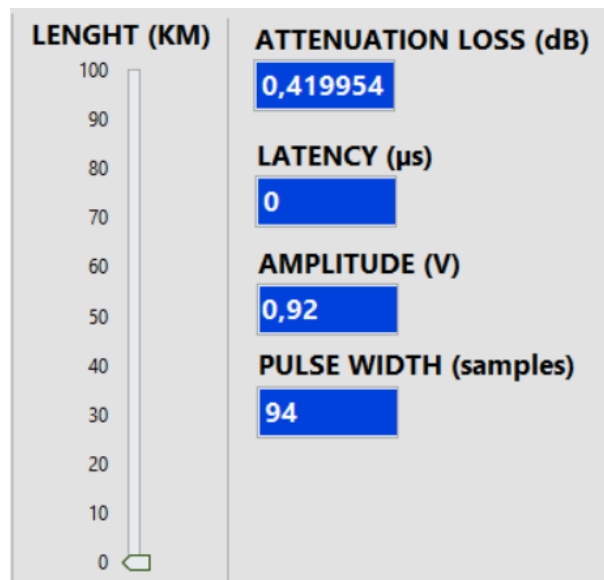
Dalšími parametry, které lze ze simulace získat je celkový útlum optického přenosu, šířka pulsů, amplituda a zpoždění přenosu. Parametry šířky (vzorky) a amplitudy (V) se určují z grafu signálu. Pro získání útlumu a světelného zpoždění (latence) se zapotřebí vzorců 5.1 5.2:

$$\alpha = 10 * \log \frac{P_2}{P_1}. \quad [dB.km^{-1}] \quad (5.1)$$

$$Latence = \frac{L * 100}{c} * n. \quad [s] \quad (5.2)$$

- L : délka přenosové trasy,
- c : rychlost světla v optickém vlákně,
- n : index lomu.

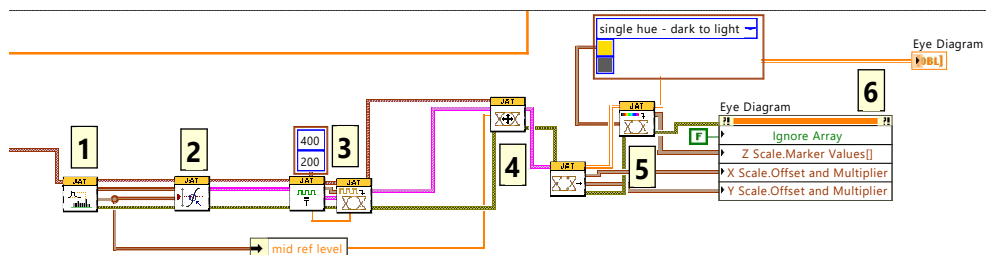
Na obr. 5.6 lze vidět grafické znázornění výsledných parametrů s možností měnit délku trasy:



Obr. 5.6: Výsledné parametry v simulačním programu.

5.2.4 Diagram oka

V simulačním programu je zahrnuta i charakteristika diagramu oka, která je implementována v programu Labview pomocí nástroje Labview Jitter Analysis Toolkit. Jedná se o doplňující software, který poskytuje knihovnu funkcí pro různé měření a testování. Na obr. 5.7 lze vidět zapojení částí nástroje Jitter Analysis Toolkit pro tvorbu diagramu oka. Vstupem je výsledný signál, které jednotlivé části zpracovávají a vyhodnocují.



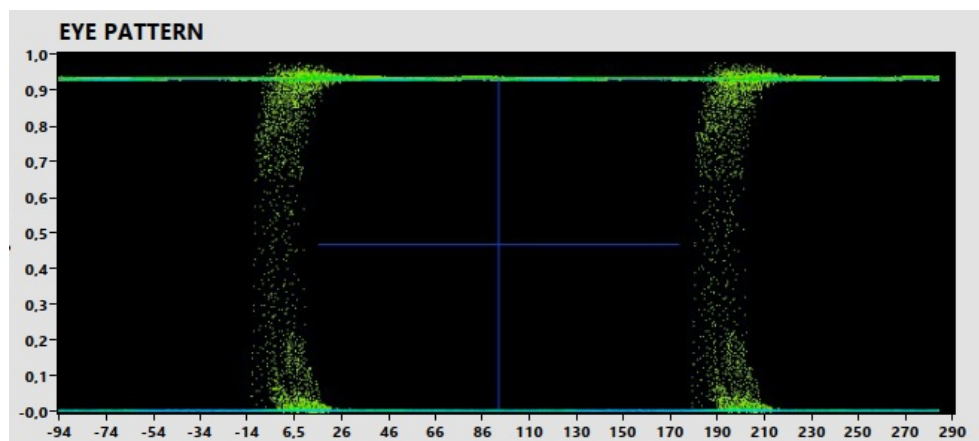
Obr. 5.7: Části nástroje Jitter Analysis Toolkit pro tvorbu diagramu oka.

Popis funkcí je následující:

- **1** - definice náběžných a sestupných hran ze vstupního signálu
- **2** - určení místa a časového údaje, kdy signál překračuje určitou úroveň, umožňuje identifikovat společnou pozici všech přechodů
- **3** - tyto bloky konstruují a rozdělují signál na jednotlivé segmenty, které se dále používají pro sestavení diagramu oka
- **4** - formátování segmentů a možnost přidání parametrů: výška, šířka, maska diagramu oka
- **5** - nastavení barevného rozpořazení diagramu - možnost dvou barev nebo gradientní barvy
- **6** - nastavení grafu diagramu oka - využití **property node**, který v tomto případě slouží k zadání vlastností grafu (určení výšky, šířky a hloubky diagramu oka)

Grafické znázornění v simulačním programu lze vidět na obr.5.8. Z diagramu oka lze vyčíst následující hodnoty:

- úrovně logické nuly a jedničky,
- čas nárůstu a pádu z přechodu 0 na 1 a obráceně,
- výšku a šířku měřeného oka.



Obr. 5.8: Diagram oka v simulačním programu.

6 Laboratorní úloha

Cíl

Cílem laboratorní úlohy je porovnání vstupního a výstupního optického signálu, a jeho parametrů. Doplnkem je analýza přenášeného optického signálu pomocí nástroje diagramu oka.

Teorie

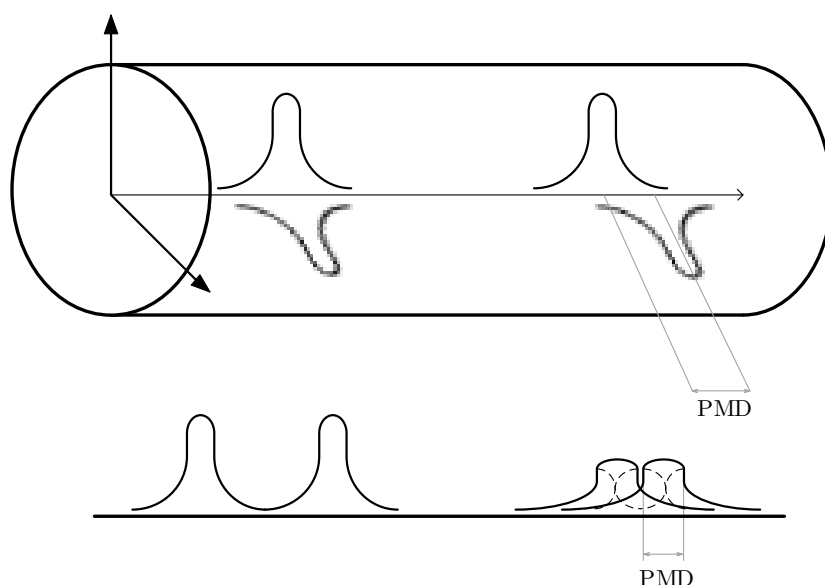
Optický přenosový systém využívá pro přenos optická vlákna. Vlákna přenáší informaci pomocí světelných paprsků s danou vlnovou délkou. Mnohavidová vlákna obvykle pracují na vlnové délce 870 nm, jednovidová na délkách 1310 nm a 1550 nm. Výhodou optických vláken je velká šířka pásma (GHz, THz), nízký útlum, odolnost proti přeslechům a bezpečnost přenosu.

Charakteristickou vlastností optických vláken je světelná disperze. Tento parametr je hlavním důvodem zkreslení optického signálu. Rozlišujeme tři hlavní druhy disperze: vidová, chromatická a polarizační vidová disperze u jednovidových vláken. Chromatická disperze je tvořena třemi složkami:

- **Materiálová disperze** je způsobena závislostí indexu lomu materiálu optického vlákna na vlnové délce záření, tudíž se vlnové délky šíří různou rychlostí, což snižuje přenosovou kapacitu. Má nepatrný vliv na disperzi vidovou, jelikož ovlivňuje dobu průchodu jednotlivých vidů.
- **Profilová disperze** je dána závislostí profilu indexu lomu na vlnové délce záření a z toho plynoucí závislosti rychlosti šíření vlny na kmitočtu. Profilová disperze je velmi malá a projevuje se u vysokých přenosových rychlostí.
- **Vlnovodná disperze** vychází ze závislosti skupinového zpoždění daného vidu na kmitočtu. Se změnou kmitočtu se ve struktuře mění tvar podélného pole vidu. Hlavní význam má v jednovidových vláknech, jako fázové zkreslení signálu, a na vlnových délkách. Parametr vlnovodné disperze je vždy záporný, umožňuje tedy kompenzovat materiálovou disperzi.

Vidová disperze omezuje šířku přenášeného pásma zejména u mnohavidových vláken. Vidy se můžou v optickém vláknu šířit různou rychlostí. Záleží na úhlu, pod kterým se vid šíří ve vlákne - vyšší vidy se šíří pomaleji. Na konci trasy bude mezi vyššími a nižšími vidy časový rozestup.

Polarizační vidová disperze se uplatňuje pouze u jednovidových vláken s přenosovou rychlostí nad 2,5 Gb/s. Vid se šíří ve dvou vzájemně na sebe kolmých polarizačních rovinách. Z důvodu nesymetrie optického vlákna, mikroohybů nebo chyb při montáži a výrobě dochází k šíření obou polarizací různou rychlostí, což má za výsledek zkreslení a rozšíření výsledného signálu, obr. 6.1.



Obr. 6.1: Polarizační vidová disperze.

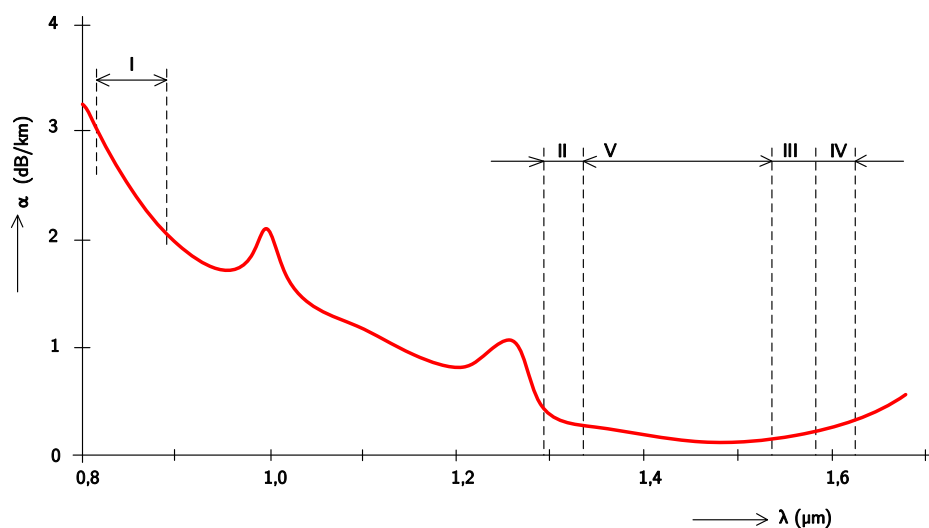
Dalším důležitým parametrem v optickém přenosu je útlum. Útlum je především způsobován absorpcí prostředí, vyzařováním z vlákna a rozptylem na nehomogenitách. Pro praktické účely je počítán koeficient útlumu, který závisí na poměru vstupního a výstupního výkonu. Koeficient je udáván v jednotkách podle vztahu 6.1:

$$\alpha = 10 \log \frac{P_{vstup}}{P_{výstup}}. \quad [dB.km^{-1}] \quad (6.1)$$

Na obr. 6.2, je útlumová charakteristika optického vlákna s okny, které se využívají pro přenos.

- I. okno (850 nm),
- II. okno (1280 - 1335 nm),
- III. okno (1530 - 1565 nm),
- IV. okno (1535 - 1610 nm),
- V. okno (1335 - 1530 nm),

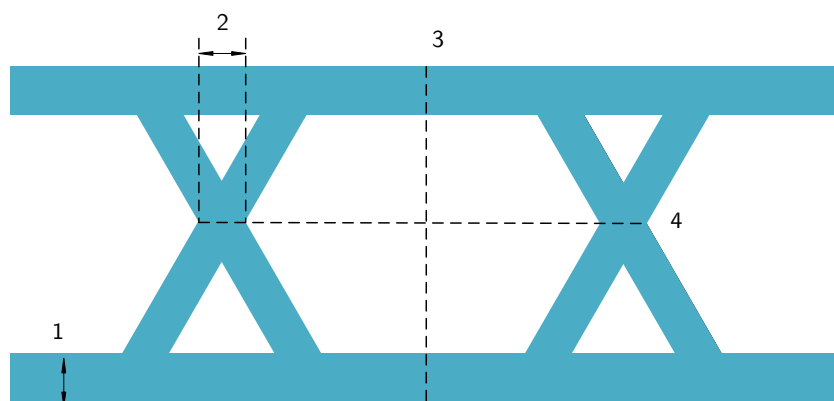
V současné době se více využívají přenosy v II. až V. okně při použití jednovídných vláken.



Obr. 6.2: Útlumová charakteristika optického vlákna.

K zjištění kvality a parametrů přenosového signálu se používá nástroj **diagram oka** obr. 6.3, který v podstatě určuje rozdíly mezi vysílaným a přijímaným digitálním signálem. Analýzu diagramu oka lze použít pro kvantifikaci kvality signálu a kontrolu přijímaného signálu.

- 1 - Maximální rozptyl amplitudy,
- 2 - Rozptyl průchodů,
- 3 - Výška oka,
- 4 - Šířka oka.



Obr. 6.3: Diagram oka.

Diagram oka znázorňuje vliv rušení v měřené části přenesené sekvence. Poměr signálu k šumu (SNR) vyjadřuje parametr Q-faktor. Tento parametr popisuje kvalitu přenosového signálu, je definován jako rozdíl středních hodnot obou úrovní signálu děleno součtem odchylek obou úrovní signálu. Dalším parametrem využívající diagram oka je parametr BER (bitová chybovost kanálu), který je dán poměrem počtu chybně přenesených bitů k celkovému počtu přenesených bitů. Pro parametr BER platí rovnice 6.2.

$$BER = \frac{N_E}{N_A}, \quad [-] \quad (6.2)$$

kde:

N_E počet chybných bitů,
 N_A celkový počet bitů.

Bitová chybovost kanálu BER je nepřímě úměrná Q-faktoru. Parametr BER lze vyjádřit pomocí Q-faktoru rovnicí 6.3:

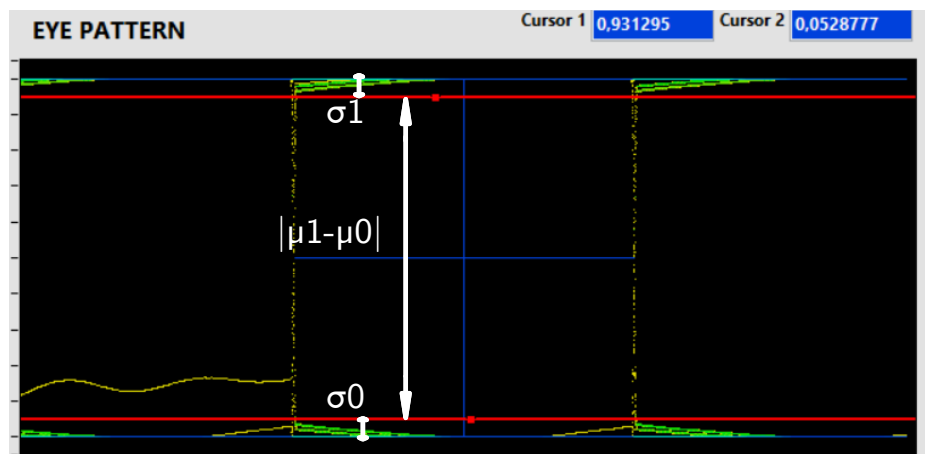
$$BER = \frac{1}{\sqrt{2\pi}Q} \exp\left(\frac{-Q^2}{2}\right). \quad [-] \quad (6.3)$$

Postup

• Simulace

- Seznamte se s grafickým rozhraním programu (GUI).
- Zadejte vstupní slovo a vyberte parametry optického přenosu:
 - * Šířku pásma nebo technologii přenosu,
 - * Linkový kód přenosu dat,
 - * Použité optické vlákno a útlum vlákna,
 - * Kontrolní součet.
- Po načtení signálu s danými parametry si vyzkoušejte měnit délku trasy (LENGHT) a pozorujte, jak se mění signál a výsledné parametry. Úkolem bude měnit různě parametry délky trasy, použitých vláken a šířky pásma/technologií. Do připravené tabulky si запиšte vstupní, tabulka 6.1 a výstupní, tabulka 6.2 parametry přenosu.
- Dalším krokem je analýza diagramu oka podle tabulky uvedené v úvodu a výpočet hodnoty BER (vzorec v teorii) při určení Q-faktoru. Obě tyto hodnoty si запиšte do tabulky. Hodnoty k výpočtu Q-faktoru získáte pomocí kurzorů, obr. 6.4 a vzorce 6.4.

$$Q = \frac{|\mu_1 - \mu_0|}{\sigma_1 + \sigma_0}. \quad [-] \quad (6.4)$$



Obr. 6.4: Určení Q faktoru z diagramu oka.

- **Reálná trasa**

- Přepněte program do módu měření reálné trasy.
- K dispozici máte optické vlákno a různé útlumové články. Do trasy postupně zapojte všechny články a sledujte, jak se mění útlum signálu. Hodnoty si запиšte do tabulky 6.3.

Tab. 6.1: Vstupní parametry měření.

VSTUPNÍ PARAMETRY			
Šířka pásma/ technologie	Optické vlákno	Útlum vlákna	Linkový kód

Tab. 6.2: Výstupní parametry měření.

VÝSTUPNÍ PARAMETRY						
Ztráta (dB/km)	Latence (s)	Amplituda (V)	Šířka (vzorky)	Délka, kde došlo k chybě (km)	Q faktor	BER

Tab. 6.3: Měření reálné trasy.

Útlumový článek	Výkon P (mW)

Závěr

Získané parametry diskutujte s vyučujícím. Jaký vliv má změna různých parametrů na výsledný signál? Jaké základní hodnoty jsme schopni vyčíst z diagramu oka?

Literatura

- [1] Optické sítě - přednášky [online]. 210 stran. Brno: doc. Ing. Miloslav Filka, CSc., 2007. Dostupné z URL:
<http://optolab.utko.feec.vutbr.cz/wp-content/uploads/Opticke_site_prednasky_P.pdf>.
- [2] SHAKE, Ippei, Hidehiko TAKARA a Satoki KAWANISHI. Simple Measurement of Eye Diagram and BER Using High-Speed Asynchronous Sampling. JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY. 2004, 2004(22), 5.

Závěr

Cílem této práce bylo rozšíření simulačního programu o výběr optických linkových kódů, použití detekčního kódu, změna přenosové rychlosti a celkové optimalizaci.

Teoretická část byla zejména zaměřena na popis základních parametrů optického přenosu. Bylo nutné se podrobněji seznámit s parametry útlumu a disperze, které jsou stěžejními parametry této práce. Bylo nutné pochopit souvislosti přenosu dat v optické vláknu na šířce pásma nebo přenosové rychlosti. V práci jsou popsány standardy pasivní optické sítě GPON, jejichž rychlosti jsou použity v simulačním programu.

Bylo zapotřebí vymyslet logiku v programu Labview pro změnu optických linkových kódů, zejména CMI a MCMI a pro výpočet cyklického redundantního součtu. Dále bylo potřeba vymyslet získání zpracovaného signálu, ze kterého je vypočítána CRC hodnota a porovnána s původní (vstupní posloupností). Problémem byla i samotná komunikace mezi platformou Red Pitaya a Labview, kde došlo k poškození optického vlákna.

Vytvořený simulační program obsahuje možnost změny optického linkového kódu, ke klasickému NRZ, byli přidány možnosti RZ, CMI a MCMI, též byla přidána možnost využít blokový kód 5B/6B. Blokový kód lze kombinovat s ostatními. K vysílané posloupnosti se vypočítá i cyklický redundantní součet CRC16 nebo CRC32, který je pak porovnáván s přijatými daty a jejich výpočtu CRC. Simulované přenosové rychlosti lze měnit podle standardů PON (BPON, GPON, XGPON, NG-PON2) nebo zadat šířku pásma (1 MHz, 100 MHz, 1 GHz a 10 GHz). Výsledné parametry lze měnit i výběrem vlákna, možnosti jsou POF, mnohavidové o vlnových délkách 850 nm a 1310 nm a jednovidové o délkách 1310 nm a 1550 nm. Charakter výsledné posloupnosti lze vyčíst z diagramu oka.

Simulační program lze využít jako výukový program pro pochopení a demonstraci parametrů disperze a útlumu a jejich závislost vůči dalším parametrům optického přenosu. Pro tento účel byla vytvořena laboratorní úloha, která popisuje základní teoretické předpoklady a ovládání programu. Po zhotovení laboratorní úlohy bude student schopen popsat, jak se výsledné hodnoty útlumu a disperze mění při použití různých vstupních parametrů a délky trasy. Kromě simulace, lze program použít pro měření reálné trasy, například pro zkoumání útlumových článků na trase nebo použitých laserů.

Literatura

- [1] FILKA, Miloslav. Optické sítě - přednášky [online]. Brno, 2007 [cit. 2020-12-07]. Dostupné z URL:
<<https://optolab.utko.feec.vutbr.cz/wp-content/uploads/Opticke-site-prednasky-P.pdf>>. Přednášky.VUT.>.
- [2] HORVÁTH, Tomáš. Pasivní optické sítě [online]. Pittsburgh, PA, USA, 2004, , 11 [cit. 2020-12-07]. Dostupné z URL:
<<http://users.ece.cmu.edu/~koopman/roses/dsn04/koopman04-crc-poly-embedded.pdf>>.
- [3] Sunshine's Homepage-Understanding CRC. Sunshine's Homepage [online]. Brno: FEKT VUT, 27. 3. 2020 [cit. 2020-12-07] Dostupné z URL:
<https://moodle.vutbr.cz/pluginfile.php/183530/mod_resource/content/1/STS-PON_Horv%C3%A1th-2020.pdf>.
- [4] ITU-T. G.984.1 GPON General characteristics. 2008. Dostupné z URL:
<<https://www.itu.int/rec/T-REC-G.984.1-200803-I/en>>.
- [5] ITU-T. G.987 10-Gigabit-capable passive optical network (XG-PON) systems: Definitions, abbreviations and acronyms. 2012. Dostupné z URL:
<<https://www.itu.int/rec/T-REC-G.987-201206-I/en>>.
- [6] ITU-T. G.989.1 40-Gigabit-capable passive optical networks (NG-PON2): General requirements. 2019. Dostupné z URL:
<<https://www.itu.int/rec/T-REC-G.989.2-201902-I/en>>.
- [7] BREED, Gary. Analyzing Signals Using the Eye Diagram. High Frequency Electronics [online]. 2005, (1105), 3 [cit. 2020-12-07]. Dostupné z URL:
<<http://www.highfrequencyelectronics.com/Nov05/HFE1105Tutorial.pdf>>.
- [8] SHAKE, Ippei, Hidehiko TAKARA a Satoki KAWANISHI. Simple Measurement of Eye Diagram and BER Using High-Speed Asynchronous Sampling. JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY. 2004, 2004(22), 5.
- [9] ITU-T G.703: Physical/electrical characteristics of hierarchical digital interfaces. 9.0. Geneva, 2016: TELECOMMUNICATION STANDARDIZATION SECTOR OF ITU, 2016. Dostupné z URL:
<<https://http://handle.itu.int/11.1002/1000/12788>>.

- [10] Geremia, P. Cyclic Redundancy Check Computation: An Implementation Using the TMS320C54x. USA: Texas Instruments, April 1999. S. 35. Application Report, SPRA530.
- [11] Error Correction and Detection Codes | CRC, Hamming, Parity. Electronics Hub - Latest Free Electronics Projects and Circuits [online]. Dostupné z URL: <https://www.electronicshub.org/error-correction-and-detection-codes>.
- [12] MOON, Todd K. Error Correction Coding: Mathematical Methods and Algorithms. Utah State University: Wiley, 2005. ISBN 0-471-64800-0.
- [13] Sunshine's Homepage-Understanding CRC. Sunshine's Homepage [online]. Dostupné z URL: <http://www.sunshine2k.de/articles/coding/crc/understanding-crc.html>.
- [14] CHAVES, Ricardo, Farhana SHEIKH, Nicolas SKLAVOS a Leonel SOUSA. Secure Hashing: SHA-1, SHA-2, and SHA-3. Circuits and Systems for Security and Privacy. London: CRC Press, 2018, s. 27. ISBN 1138586048.
- [15] GOEMANS, Michel. Linear Error-Correcting Codes [online]. MIT, 2015 [cit. 2020-12-07]. Dostupné z URL: <https://math.mit.edu/~goemans/18310S15/Hamming-code-notes.pdf>. Lecture.MIT.
- [16] Red Pitaya - Stemplab swiss army knife for engineers. Red Pitaya - Stemplab swiss army knife for engineers [online]. Copyright © 2020 StemLabs. All rights reserved. [cit. 11.12.2020]. Dostupné z URL: <https://www.redpitaya.com/>.
- [17] Learn LabVIEW: intro to graphical programming in NI LabVIEW - National Instruments. (2021, May 19). Ni.Com. Dostupné z URL: <https://www.ni.com/getting-started/labview-basics/>.
- [18] Remote control (Matlab, Labview, Scilab or Python) — Red Pitaya 0.97 documentation. (2021, May 19). Redpitaya.Readthedocs.Io. Dostupné z URL: <https://redpitaya.readthedocs.io/en/latest/appsFeatures/remoteControl/>.
- [19] Koheron | Prototype laser systems *Koheron / Prototype laser systems* [online]. Copyright © Koheron [cit. 02.04.2019]. Dostupné z URL: <https://www.koheron.com/>.

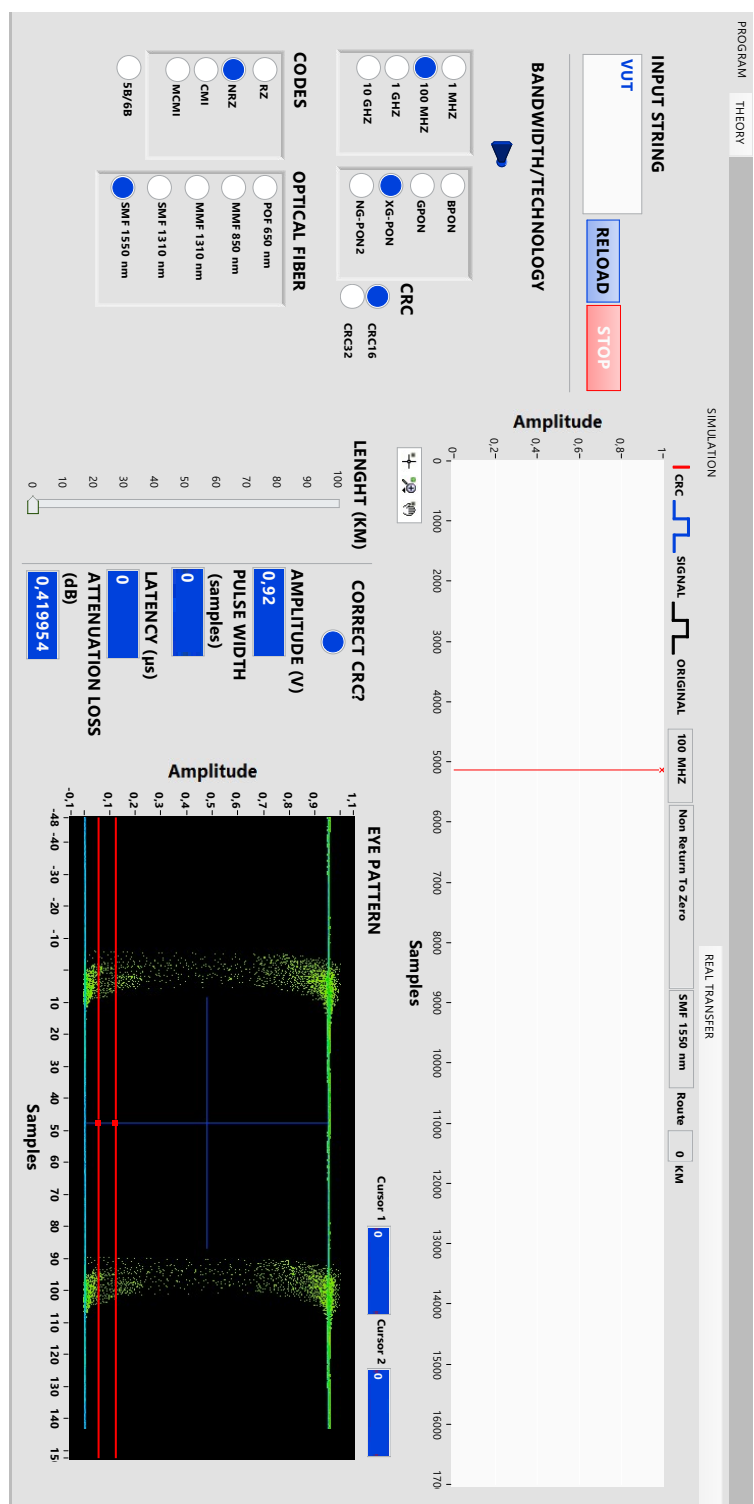
Seznam symbolů, veličin a zkratek

AMI	Alternate Mark Inversion
APON	ATM passive optical network
ATM	Asynchronous Transfer Mode
ATN	Aeronautical Telecommunication Network
BER	Bit Error Rate
BPON	Broadband Passive Optical Network
CMI	Codec Mark Inversion
CRC	Cyclic redundancy check
EDFA	Erbium-Doped Fiber Amplifiers)
GPON	Gigabit Passive Optical Network
HDB3	High-density Bipolar-3 zeros)
LRC	Longitudinal Redundancy Check
MCM	Modified Codec Mark Inversion
NG-PON2	Next-Generation Passive Optical Network
NRZ	Non-return-to-zero
OLT	Optical line terminal
ONU	Optical Network Unit
PON	Passive optical network
RZ	Return-to-zero
SHA	Secure Hash Algorithm
SNR	Signal to Noise Ratio
VRC	Vertical redundancy check
XG-PON	10 Gigabit Passive Optical Network

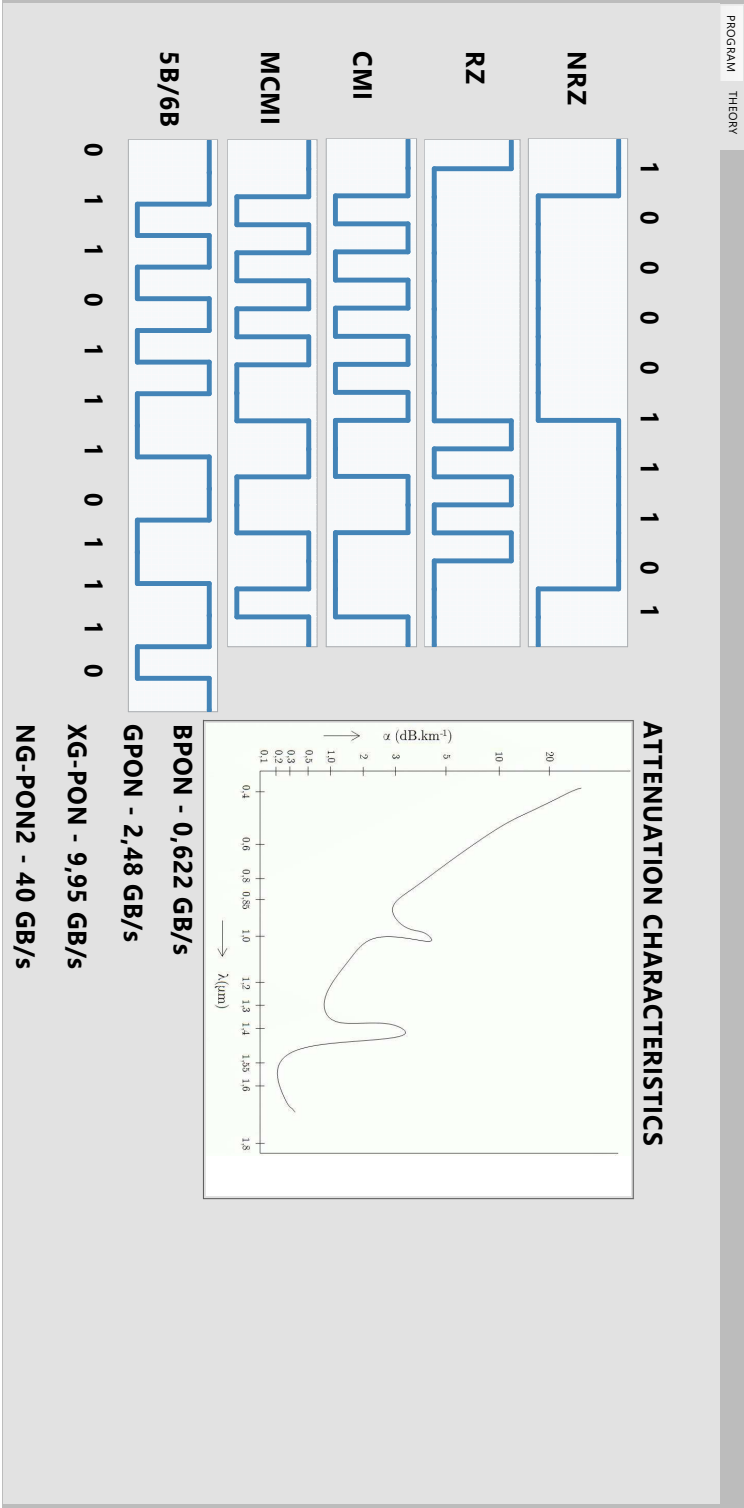
Seznam příloh

A Přední panel - simulace	52
B Přední panel - teorie	53
C Zapojení komponent	54
D Obsah přiloženého CD	55

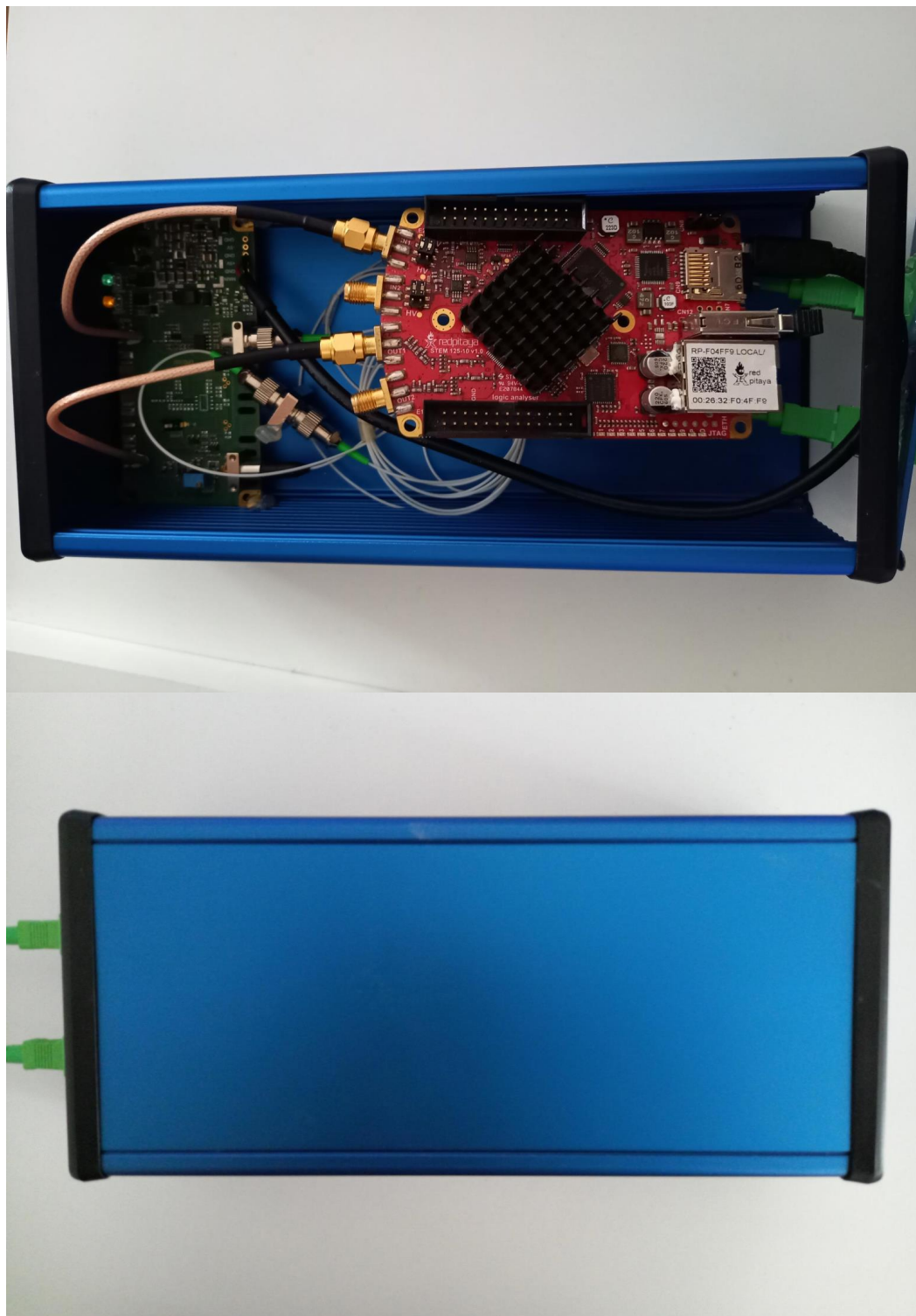
A Přední panel - simulace



B Přední panel - teorie



C Zapojení komponent



D Obsah přiloženého CD

Na přiloženém CD se nachází elektronická verze bakalářské práce ve formátu .pdf. Dále CD obsahuje .zip soubor s vytvořeným simulačním programem v LabView s koncovkou .vi a složkou s vytvořeným exe souborem s výsledným programem.

```
/.....kořenový adresář přiloženého CD
├─ Diplomová práce Tomáš Horský
│   └─ Diplomová práce Tomáš Horský.pdf.....elektronická verze DP
│       └─ Simulační program.zip.....komprimované soubory s programem
│           └─ Simulační program.vi.....simulační program v prostředí LabView
│               └─ Simulační program EXE.....simulační program exe verze
│                   └─ Application.aliases
│                       └─ Application.exe
│                           └─ Application.ini
```